

Zur Tragfähigkeitssteigerung thermoplastischer Zahnräder mit Füllstoffen

vorgelegt von
Dipl.-Ing. Jan Rösler
aus Berlin

der Fakultät V der Technischen Universität Berlin
zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor der Ingenieurwissenschaften
- Dr.-Ing.-
genehmigte Dissertation

Promotionsausschuss:

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Hans-Helmut Pucher

Berichter: Prof. Dr.-Ir. Lucienne Blessing

Prof. Dr.-Ing. Heinz Mertens

Tag der wissenschaftlichen Aussprache: 29. Oktober 2004

Berlin 2005

D 83

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Konstruktionstechnik und Entwicklungsmethodik der Technischen Universität Berlin. Sie wurde finanziell durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) unterstützt.

Frau Prof. Dr.–Ing. L. Blessing, Leiterin des Fachgebietes Konstruktionstechnik und Entwicklungsmethodik, danke ich für die Betreuung sowie die Anregungen zur Verbesserung der Arbeit.

Herrn Prof. Dr.–Ing. H. Mertens, Leiter des Fachgebietes Konstruktionslehre, danke ich für sein besonderes Interesse und Engagement bei der Betreuung der Arbeit. Durch seine wertvollen und kritischen Anregungen trug er wesentlich zum Gelingen der Arbeit bei.

Prof. Dr.–Ing. E.h. Dr.–Ing. W. Beitz[†], ehemaliger Leiter des Fachgebietes Konstruktionstechnik am Institut für Maschinenkonstruktion der TU Berlin, danke ich dafür, dass er mir die optimalen Möglichkeiten für diese Arbeit gab.

Dr.-Ing. O. Tegel, ehemaliger Oberingenieur und zeitweise kommissarischer Leiter des Fachgebietes Konstruktionstechnik und Entwicklungsmethodik, danke ich für seine Unterstützung sowie für die angenehme Arbeitsatmosphäre.

Ferner bedanke ich mich bei Prof. Dr.-Ing. H.H. Pucher für die Bereitschaft den Vorsitz des Promotionsausschusses zu übernehmen.

Bedanken möchte ich mich bei allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Institutes für die Unterstützung.

Für die tatkräftige Unterstützung danke ich den studentischen Mitarbeitern M. Clausing, H. Krüger, D. Weniger und Y. Yambaha.

Berlin, im Mai 2005

Kurzfassung

Rösler, Jan

Zur Tragfähigkeitssteigerung thermoplastischer Kunststoffzahnräder mit Füllstoffen

Tragfähigkeitskennwerte von Kunststoffzahnrädern werden zur Zeit ausschließlich mit standardisierten Laufversuchen bestimmt. Die gemessenen Kennwerte gelten streng nur bei ähnlichen Bedingungen. Eine analytische Berechnung der Tragfähigkeit von Kunststoffzahnrädern ist bei dem heutigen Stand der Forschung mit vielen Unsicherheiten verbunden.

Die vorliegende Arbeit liefert eine neue Auswertungsstrategie für solche Versuche sowie weiterführendes Wissen über bisher als Zahnradwerkstoff nicht eingesetzte Kunststoffe.

Durch experimentelle Untersuchungen an trockenlaufenden Kunststoffzahnrädern wurden Möglichkeiten zur Steigerung der Tragfähigkeit (übertragbare Leistung) und des Wirkungsgrades (geringere Übertragungsverluste) sowie zur Reduzierung des Verschleißes aufgezeigt. Dazu wurden Standardkunststoffe mit Trockenschmierstoffen und/oder Fasern modifiziert.

Weiterhin konnten für ölgeschmierte Kunststoffgetriebe deutlich höhere Tragfähigkeiten gegenüber bisherigen Kunststoffen bei erhöhten Temperaturen (120°C Öltemperatur) durch den Einsatz von Hochtemperaturthermoplasten erreicht werden.

Die Versuchsergebnisse zeigen, dass einige der untersuchten Hochtemperaturthermoplaste bei Ölschmierung und 120°C als Zahnradwerkstoff in höher belasteten Getrieben eingesetzt werden können. Der Einsatz von Kunststoffzahnrädern bei diesen Temperaturen war mit den bisher eingesetzten Kunststoffen nicht möglich.

1 Einleitung und Ziel der Arbeit	5
1.1 Einführung	5
1.2 Stand der Forschung.....	6
1.2.1 Kunststoffe – Aufbau und Eigenschaften	6
1.2.2 Füll- und Verstärkungsstoffe.....	8
1.2.3 Kunststoffzahnräder	10
1.3 Ziel der Arbeit.....	15
1.4 Aufbau der Arbeit	16
2 Kunststoffauswahl	17
2.1 Anforderungen an den Werkstoff	17
2.2 Schadensanalyse vorangegangener Untersuchungen an Kunststoffzahnradern	18
2.3 Auswahl geeigneter Werkstoffe zur Optimierung von Tragfähigkeit, Wirkungsgrad und Verschleiß	23
3 Versuchszahnräder/ Versuchsp Parameter	26
3.1 Untersuchte Thermoplaste	26
3.2 Verzahnungsgeometrie.....	28
3.3 Probenherstellung	29
3.4 Verzahnungsqualitäten.....	31
3.5 Prüfgetriebe und Betriebsparameter.....	35
3.6 Versuchsplan.....	38
4 Versuchseinrichtungen und Messmethoden.....	39
4.1 Getriebeversuche.....	39
4.2 Wirkungsgradermittlung	41
4.3 Messen der Zahnmasse-temperatur	45
4.4 Verschleiß- und Kriechverformungsmessung.....	47
4.5 Geräuschmessung.....	48
5 Versuchsergebnisse	49
5.1 Tragfähigkeit.....	49
5.1.1 Schadensarten	49
5.1.2 Versuchsauswertung	57
5.1.3 Tragfähigkeit ölgeschmierter Kunststoff/Stahl Paarungen.....	64
5.1.4 Vergleich der ermittelten Tragfähigkeiten für die ölgeschmierten Zahnrad-er.....	66
5.1.5 Tragfähigkeit trockenlaufende Kunststoff/Stahlpaarungen	68
5.1.6 Vergleich der Zeitfestigkeiten für trockenlaufende Zahnrad-er.....	78
5.2 Zahnmasse-temperatur	80
5.3 Wirkungsgradmessungen	82
5.4 Geräuschpegel.....	84
5.5 Verschleiß und Kriechverformung.....	87
6 Zusammenhänge und Interpretationen.....	100
6.1 Tragfähigkeit.....	100
6.2 Zahnmasse-temperatur	106
6.3 Wirkungsgrad.....	107
7 Einordnung der Ergebnisse nach der Richtlinie VDI-2545¹¹²	

7.1 Zahnfußspannungen	112
7.2 Zahnflankenpressung	113
7.3 Belastungskennwerte	114
8 Anwendungshinweise.....	118
9 Zusammenfassung und Ausblick	121
9.1 Zusammenfassung.....	121
9.2 Ausblick	123
10 Quellenverzeichnis.....	125
11 Anhang	129
A.1 Berechnung der Kunststoffzahnräder.....	129
<i>A.1.1 Berechnung der Zahnfußtragfähigkeit.....</i>	<i>129</i>
<i>A.1.2 Berechnung der Zahnflankentragfähigkeit.....</i>	<i>129</i>
<i>A.1.3 Berechnung der Zahnmasse­temperatur.....</i>	<i>130</i>
A.2 Übersicht der Werkstoffeigenschaften	132
A.3 Übersicht der ermittelten Kennwerte	133
A.4 Fehlerbetrachtungen.....	135
A.5 Versuchsprotokolle	138

Zeichen	Einheit	Bezeichnung
a	m ² /s	Temperaturleitzahl von Luft, $a=21,8 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ [Dubb-90]
a	mm	Achsabstand
a"	mm	Zweiflanken - Wälzabstand
A	m ²	Oberfläche des Getriebegehäuses
b	mm	Zahnradbreite
c	N/mm ²	Belastungsfaktor
d _a	mm	Kopfkreisdurchmesser,
d _b	mm	Grundkreisdurchmesser, $d_b = z \cdot m \cos \alpha$
d _t	mm	Teilkreisdurchmesser, $d_t = m \cdot z$
e	mm	Die Eintauchtiefe ist der Abstand vom Kopfkreisdurchmesser zum Ölstandspegel im eingelaufenen Zustand.
E	N/mm ²	E-Modul des Werkstoffes
E'	N/mm ²	berücksichtigt die Modulunterschiede der unterschiedlichen Werkstoffe $E' = \frac{2 \cdot E_1 \cdot E_2}{E_1 + E_2}$
E _c	N/mm ²	Das Kriechmodul ($E_c = \sigma/\epsilon$) wird im Zeitstand-Zugversuch nach DIN 53 444 mit Probekörper in einem konstanten Prüfklima ermittelt. Die Prüfkraft, welche die Probekörper einachsrig belasten, bleiben während der Versuchsdauer gleich [Sae-92]. Die genannten Werte gelten bei 20°C.
f"	µm	Der Wälzsprung ist die größte auf dem Radumfang vorkommende Differenz des Wälzachsabstandes a'' während eines Zahneingriffes [NiWi-83] (siehe Abb. 10).
f _{Hα}	µm	Die Profil-Winkelabweichung ist der Abstand zwischen den beiden Nenn- Profilen, die an den Endpunkten des Prüfbereiches das um eine Schrägungskomponente veränderte Nenn-Profil schneiden.
f _{fα}	µm	Die Profil-Formabweichung ist der Abstand zwischen den beiden Evolventen des Ist-Grundkreises, die innerhalb des Prüfbereiches das Ist-Profil berührend einschließen [Linke-96].
F"	µm	Die Wälzabweichung ist die größte Differenz des Wälzabstandes a'' während einer Raddrehung [NiWi-83] (siehe Abb. 10).
F _t	N	Tangentalkraft; $F_t = 2 \cdot M_t/d_t$
F _t /b	N/mm	Linienlast (Tangentalkraft/Zahnbreite)
F _{nm}	N	mittlere Zahnnormalkraft
F _n	N	Nennlast
F _α	µm	Die Profil-Gesamtabweichung ist der Abstand zwischen den beiden Nenn-Profilen, die innerhalb des Prüfbereiches die Zahnflanke berührend einschließen [Linke-96].
k	-	Neigungsexponent der Wöhlerkennlinie
k	-	Anzahl der Messzähne für die Zahnweitenmessung
k ₁	-	Faktor für die Größe der wärmeabgebenden Fläche.
k ₂	-	Faktor, der die Materialpaarung berücksichtigt und ob Zahnflanken- oder Zahntemperatur berechnet wird. hier $k_2=1,0$ [nach VDI-2545]
k ₃	-	Faktor berücksichtigt wie weit das Getriebegehäuse offen ist. Hier $k_3= 0$ für offene Getriebe.
K	in ⁵ · min ft · lb · hr	Abriebfaktor, der auf Druckscheibenprüfstand bestimmt wird. Volumenverschleiß zu Druck, Geschwindigkeit und Laufzeit, Literaturwert aus [LNP] $\frac{\text{in}^5 \cdot \text{min}}{\text{ft} \cdot \text{lb} \cdot \text{hr}} = 1,2996 \cdot 10^{-10} \text{ m}^4/\text{N} = 129,96 \text{ mm}^4/\text{N}$
K _A	-	Anwendungsfaktor, nach [VDI-2545] hier $K_A=1,0$
m	mm	Modul der Verzahnung
M _t	Nm	im Teilkreis wirkende Drehmoment
n	-	Anzahl der Proben
N _i (F _t /b)	-	Lastspielzahl einer Probe (mit Zählerindex i) in Abhängigkeit der Linienlast
N _{10%}	-	Lastspielzahl mit 10% Ausfallwahrscheinlichkeit
N _{90%}	-	Lastspielzahl mit 90% Ausfallwahrscheinlichkeit
N [*] _{10%}	-	bezogene Lastspielzahl mit 10% Ausfallwahrscheinlichkeit
N [*] _{90%}	-	bezogene Lastspielzahl mit 90% Ausfallwahrscheinlichkeit
N _{10%,Parcsin(i)}	-	Lastspielzahl mit 10% der Streubandposition
N _{90%,Parcsin(i)}	-	Lastspielzahl mit 90% der Streubandposition
N [*] _{10%,Parcsin(i)}	-	bezogene Lastspielzahl mit 10% der Streubandposition
N [*] _{90%,Parcsin(i)}	-	bezogene Lastspielzahl mit 90% der Streubandposition
\bar{N}	-	erreichbare Lastspielzahl mit 50% Ausfallwahrscheinlichkeit bei der gewählten Linienlast
N [*]	-	bezogene logarithmische Lastspielzahl
N ₂₀	-	Bezugslastspielzahl für F _t /b=20 N/mm im trockenlaufenden Betrieb, siehe Kap. 5.1.6
N ₄₀	-	Bezugslastspielzahl für F _t /b=40 N/mm im ölgeschmierten Betrieb, siehe Kap. 5.1.4
P _{arc sin(i)}	%	Argument der arc sin \sqrt{P} -Funktion-2/π
P(i)	%	Ausfallwahrscheinlichkeit
Pr	W	mittlere Reibleistung

P	W	Prüfleistung
Q ₁	W	im Eingriff entstehende Wärmemenge
Q ₂	W	vom Zahnrad in den Getriebeinnenraum abgegebene Wärmemenge
Q ₃	W	vom Getriebegehäuse nach außen abgegebene Wärmemenge
r	-	Anzahl der Brüche
R _a	µm	Der Mittenrauhwert (Maß für die Oberflächenrauigkeit), ist der arithmetische Mittelwert der absoluten Beträge der Abstände y des Rauheitsprofils von der mittleren Linie innerhalb der Messstrecke [Hoi-94].
S _F	-	Sicherheit gegen Zahnfußbruch
S _H	-	Sicherheit gegen Grübchenbildung
T _g	°C	Die Glasstemperatur ist die Temperatur bei größter Änderung der Werkstoffsteifigkeit im nicht geschmolzenen Zustand.
T _i	°C	Temperatur im Getriebeinnern
T _N	-	Streuspanne, $T_N = N_{10\%} / N_{90\%}$
T _m	°C	Schmelztemperatur
T _u	°C	Umgebungstemperatur
T _z	°C	Die Zahnmassestemperatur wird in Zahnradversuchen ermittelt. siehe Kap. 5.2
T _{z1}	°C	die Zahnmassestemperatur des Ritzels
T _{z2}	°C	die Zahnmassestemperatur des Rades
u	-	Zähnezahlverhältnis $Z_{\text{Großrad}}/Z_{\text{Kleinrad}}$, hier $u = z_2/z_1$
v _t	m/s	Teilkreisgeschwindigkeit
V _{gA}	m/s	Gleitgeschwindigkeit im Zahnfuß des treibenden Rades
V _{gE}	m/s	Gleitgeschwindigkeit am Zahnkopf des treibenden Rades, die Gleitgeschwindigkeit ist die Differenz der absoluten Tangentialgeschwindigkeiten am Flankenberührungspunkt
V _{gm}	m/s	mittlere Gleitgeschwindigkeit
W _k	mm	Nach [DIN-3960] ist W _k bei einem Außenrad der über k*=2,3,4 usw. Zähne gemessene Abstand zweier paralleler Ebenen, die je eine Rechts- und Linksflanke im evolventischen Teil der Zahnflanken berühren.
x	-	Profilverschiebungsfaktor
Y _F	-	Zahnformfaktor, abhängig von Zähnezahl und Profilverschiebung, hier Y _F = 2,58 nach [VDI-2545]
Y _ε	-	Überdeckungsfaktor, der die Lastverteilung auf mehrere Zahnpaare erfasst, hier Y _ε =0, 617 nach [VDI-2545]
Y _β	-	Schrägungsfaktor, da β=0° ist hier Y _β = 1,0
z	-	Zähnezahl
Z _ε	-	Überdeckungsfaktor
Z _H	-	Zonenfaktor, der die Zahnflankenkrümmung erfasst. $Z_H = \frac{1}{\cos \alpha} \cdot \sqrt{\frac{1}{\tan \alpha}}$ nach [VDI-2545] Z _H = 1,78
Z _M	$\sqrt{\frac{N}{\text{mm}^2}}$	Elastizitätsfaktor, der die Elastizität der Werkstoffpaarung berücksichtigt. $Z_M = \sqrt{0,36E}$
α	°	Eingriffswinkel (im Normalschnitt)
α _w	$\frac{W}{m \cdot K}$	Wärmeübergangszahl
β	-	Schrägungswinkel, hier β= 0°
λ	W/mK	Wärmeleitzahl von Luft, λ = 0,02603 W/mK [Dubb-90]
ε	%	Dehnung
ε _α	-	Profilüberdeckung = ε ₁ + ε ₂ , hier ε _α = 1,62
ε ₁	-	Teilüberdeckung
ε ₂	-	Teilüberdeckung
η	%	mittlerer Wirkungsgrad
μ	-	Dynamische Reibungskoeffizient, der auf Druckscheiben-Prüfgerät über das Reibmoment zweier gegenläufig drehender aufeinander gedrückter Scheiben ermittelt wird. Literaturwert aus [LNP]
μ _m	-	mittlerer errechneter Reibungskoeffizient (siehe Kap. 6.3)
σ	N/mm ²	Dehnspannung
σ _B	MPa	Biegefestigkeit Ein auf zwei seitliche Stützen abgelegter Probekörper wird mittig belastet. Aus der Bruchlast [N] wird unter Berücksichtigung des von der Stützweite abhängigen Biegemomentes und des von den Querschnittsabmessungen des Probekörpers abhängigen Widerstandsmomentes die Biegefestigkeit errechnet [Sae-92].
σ _H	N/mm ²	auftretende Zahnflankenspannung
σ _{HN}	N/mm ²	ertragbare Zahnflankenspannung
σ _F	N/mm ²	auftretende Zahnfußspannung
σ _{FN}	N/mm ²	ertragbare Zahnfußspannung

Tafel 1: Zeichen und Einheiten

1 Einleitung und Ziel der Arbeit

Das Ziel dieser Arbeit ist es, Potentiale zur Steigerung der Tragfähigkeit und des Wirkungsgrades sowie zur Reduzierung des Verschleißes hochbelasteter Kunststoffzahnräder mit modifizierten Werkstoffzusammensetzungen experimentell aufzudecken. In die Bewertung werden die Kriechverformungen sowie die Geräusche und Wärmeentwicklung einbezogen. Anhand der Ergebnisse dieser Arbeit sollen für Kunststoffzahnräder neue Einsatzgebiete erschlossen werden.

1.1 Einführung

Stirnzahnräder wandeln schlupffrei Drehzahlen und Momente zwischen nichtfluchtenden Wellen. Die wesentlichen Vorteile von Kunststoffzahnradern gegenüber Stahlzahnradern sind die Wirtschaftlichkeit durch Massenfertigung mittels des Spritzgussverfahrens, die Möglichkeit des trockenlaufenden Betriebes, ein geräuscharmer Lauf, Gewichtseinsparungen, die Möglichkeiten der Integralbauweise und des Einsatzes in aggressiven Medien. Nachteile sind die geringeren Tragfähigkeiten, der begrenzte Temperatureinsatzbereich und die nicht vorhandene Dauerfestigkeit. Weiterhin ist die Auslegung von Kunststoffgetrieben von vielen Einflussfaktoren abhängig. So nimmt z.B. die Tragfähigkeit mit steigender Umgebungstemperatur rasch ab.

Kunststoffzahnräder werden daher in niedrig belasteten Getrieben für Massenprodukte eingesetzt, unter anderem in Haushaltsgeräten (z.B. Bohrmaschinen und Rührgeräte), Kraftfahrzeugen (Sitzverstellungen) und Büromaschinen (Kopierer). Sie können dabei ohne Schmierung, mit einer einmaligen Einbaufettschmierung, mit Ölschmierung oder in seltenen Fällen auch mit einer Wasserschmierung verwendet werden. Ein weiteres großes Anwendungsgebiet der Kunststoffzahnräder sind feinwerktechnische Getriebe.

Die Tragfähigkeitskennwerte der Kunststoffzahnräder beruhen ausschließlich auf experimentellen Laufversuchen. Die zugehörigen Kennwerte gelten deshalb meist nur bei ähnlichen Bedingungen. Unter stark abweichenden Bedingungen sind erhebliche Differenzen von den ermittelten Tragfähigkeitskennwerten möglich, die dann bestenfalls eine Orientierung hinsichtlich der zu erwartenden Tragfähigkeiten bieten. Somit empfiehlt sich für jeden einzelnen Anwendungsfall die Erprobung eines

Prototyps. Eine analytische Berechnung der Tragfähigkeit von Kunststoffzahnradern ist beim heutigen Stand der Forschung mit vielen Unsicherheiten verbunden. Statische Festigkeitskennwerte eines Kunststoffes geben kaum Auskunft über die Eignung als Zahnradwerkstoff. Beim Einsatz neuer, bisher nicht untersuchter Kunststoffe als Zahnradwerkstoff, ist damit nur eine sehr unsichere Abschätzung der Lebensdauer möglich.

1.2 Stand der Forschung

1.2.1 Kunststoffe – Aufbau und Eigenschaften

Kunststoffe sind organische, hochmolekulare Werkstoffe (Polymere), die überwiegend synthetisch hergestellt werden [Dubb-90]. Sie bestehen aus linearen oder verzweigten Molekülketten, welche durch Querbrücken miteinander vernetzt werden können. Der Grad der Vernetzung beeinflusst maßgeblich die mechanischen Eigenschaften. Das Vernetzen bewirkt eine Abnahme der Beweglichkeit der Moleküle. Mit zunehmender Quervernetzung wird der Werkstoff steifer und härter. Die Festigkeit steigt und die Verformungsfähigkeit sinkt.

Polymere mit einer geringen Vernetzung sind elastische Kunststoffe, auch Elastomere (beispielsweise Silikonkautschuk) genannt. Diese weisen eine große elastische Dehnbarkeit auf. Stark vernetzte Kunststoffe sind Duroplaste (z.B. Epoxidharz, Aminoplaste). Diese sind aufgrund der engen Verknüpfung unlöslich, nicht schmelzbar, nicht schweißbar, eine Überhitzung führt zur Zersetzung. Duroplaste kommen als Zahnradwerkstoff nur sehr selten zum Einsatz, da sie nicht spritzgießbar sind. Da diese Fertigungsart ausschlaggebend für Kunststoffzahnradern ist, überwiegt der Einsatz der spritzgießbaren Thermoplaste. Diese (z.B. Polyamid) sind lineare (unvernetzte) Polymere. Sie besitzen eine geringere Festigkeit und Härte als Duroplaste, welche bis zu den Grenztemperaturen des thermo-chemischen Abbaus hart, steif und spröde bleiben. Im Gegensatz zu Duroplasten verringert sich bei ihnen die Festigkeit mit steigender Temperatur.

Thermoplaste lassen sich in amorphe und teilkristalline Thermoplaste untergliedern. Bei den amorphen sind die einzelnen Polymerketten wie ein Wattebausch ineinander verknäult (Abb.1), während bei den teilkristallinen Thermoplasten die Makromoleküle teilweise in „kristallinen“ Bereichen und „amorphen“ Bereichen angeordnet sind (Abb.1).

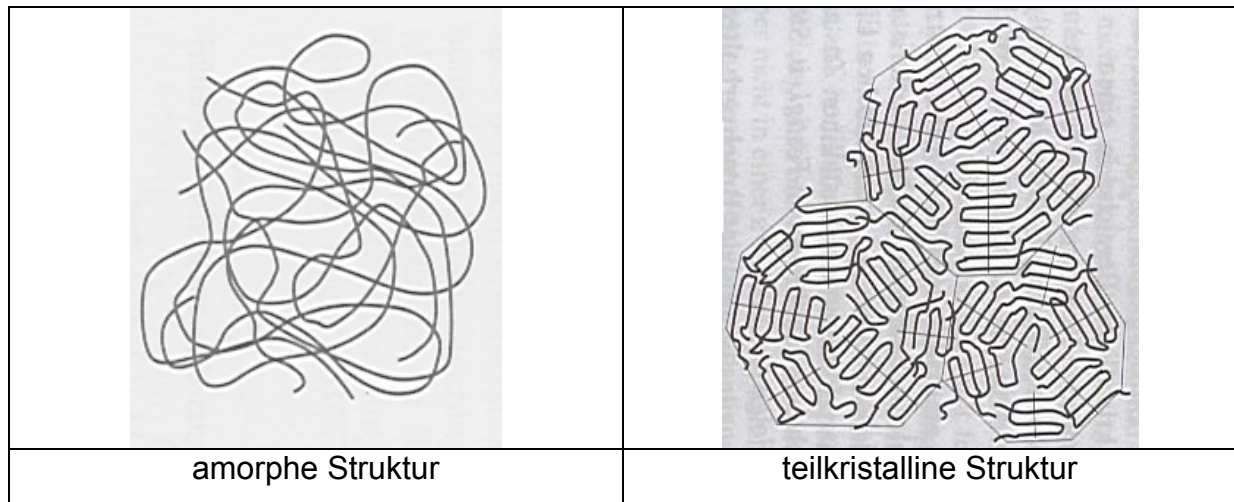


Abb. 1: Vergleich des strukturellen Aufbaus von amorphen und teilkristallinen Thermoplasten

Unterhalb der Erweichungs-(Glas-)temperatur sind die amorphen und kristallinen Bereiche spröde und fest. Die Glasstemperatur (T_g) ist die Temperatur bei größter Änderung der Werkstoffsteifigkeit im nicht geschmolzenen Zustand. Amorphe Kunststoffe können konstruktiv grundsätzlich nur unterhalb der Glasstemperatur eingesetzt werden, wegen ihrer spröden Eigenschaften sind sie aber nicht für Zahnräder in Leistungsgetrieben geeignet. Beispielsweise sind Polycarbonate ($T_g = 145^\circ\text{C}$) wegen der starken Empfindlichkeit gegen Wechselbiegebeanspruchung nur zum Übertragen kleiner Kräfte und Relativgeschwindigkeiten einsetzbar [Meng-66]. Auch Polystyrol ist nur für die Übertragung kleiner oder vernachlässigbar kleiner Kräfte geeignet [Krau-85].

Bei den teilkristallinen Thermoplasten erweichen bei Temperatursteigerung zuerst die amorphen Anteile, während die kristallinen Bereiche noch verstärkend wirken. Deshalb verhält sich der Kunststoff im zugehörigen Temperaturbereich biegeweich und zäh (thermo-elastischer Zustand). Dieses Verhalten begründet das zähelastische Verhalten teilkristalliner Polymere bei hoher Widerstandsfähigkeit gegen mechanische Beanspruchung. Aufgrund dieser Eigenschaften sind teilkristalline Thermoplaste für Zahnräder in Leistungsgetrieben besonders geeignet. Deshalb sind für Leistungsgetriebe solche teilkristallinen Thermoplaste auszuwählen, für die die zu erwartenden Zahnmassestemperaturen T_z (siehe auch Kap. 4.3) über der Glasstemperatur T_g und unterhalb der Schmelztemperatur T_m liegen. Bei den meist in Getrieben eingesetzten Thermoplasten POM (Polyoxymethylen) und PA66 (siehe Kap.1.2.3) liegt die Zahnmassestemperatur T_z zwischen der Glasstemperatur T_g und der Schmelztemperatur T_m . Bei POM ist die Glasstemperatur T_g mit -60°C kleiner

als die Zahnmasse-temperatur T_z mit 55 - 70°C [Heym-97] und diese ist kleiner als die Schmelztemperatur T_m mit 165°C. Bei PA66 ist die Glas-temperatur T_g mit 5°C kleiner als die Zahnmasse-temperatur T_z mit 70 bis 85°C [Heym-97] und diese ist kleiner als die Schmelztemperatur T_m mit 255°C.

Teilkristalline Thermoplaste besitzen auch eine höhere Verschleißfestigkeit als amorphe, was nochmals ihre Eignung für Kunststoffzahn-räder belegt. Dies bewiesen HACHMANN und STRICKLE [HaSt-69] bei tribologischen Untersuchungen an Kunststoffen.

Nicht alle teilkristallinen Thermoplaste sind als Zahnradwerkstoff für große Stückzahlen geeignet. Da das kostengünstige Spritzgießverfahren ein Hauptgrund für den Einsatz von Kunststoffzahn-rädern ist, scheiden zwangsläufig die nicht spritzgießbaren Polyimide (PI) und Polytetrafluoräthylene (PTFE) aus. Auch der extrem hohe Preis von Polyimid (250-500 Euro/kg) erlaubt einen Einsatz höchstens in ausgewählten Sonderfällen. Dem gegenüber ist POM für ein bis zwei Euro pro Kilo erhältlich. Polyphenylensulfid (PPS) kann wegen seiner schlechten Verschleiß-eigenschaften für den trockenlaufenden Betrieb ausgeschlossen werden. Polyäthylen (PE) kann aufgrund seiner begrenzten zulässigen Oberflächentemperatur (55°C [BASF-96]) nicht bei hochbelasteten Getrieben im trockenlaufenden Betrieb eingesetzt werden, da dabei diese Temperaturen überschritten werden.

1.2.2 Füll- und Verstärkungsstoffe

Durch die Zugabe von Füll- und Verstärkungsstoffen können die Eigenschaften eines Kunststoffes optimiert werden. Die wichtigsten Füll- und Verstärkungsstoffe, welche die mechanischen und tribologischen Eigenschaften von Kunststoffen beeinflussen, werden in Tab.1 betrachtet.

Füll- oder Verstärkungsstoff	Einfluss auf die mechanischen und tribologischen Eigenschaften
Glas-, Kohlenstoff- und Aramidfasern	Erhöhung der Steifigkeit, Zugfestigkeit, Wärmeformbeständigkeit, Biegegewichseigenschaft, Verringerung der Schlagzähigkeit
PTFE	reibungs- und verschleißmindernd
PE	reibungs- und verschleißmindernd
Graphit	reibungs- und verschleißmindernd, Erhöhung der thermischen Leitfähigkeit
Silikonöl	reibungs- und verschleißmindernd, Erhöhung der Zähigkeit
Wolframsulfid	reibungs- und verschleißmindernd
Mineralische Füllstoffe (Kreide und Kalkstein)	Erhöhung der Temperaturbeständigkeit und Schlagzähigkeit
MoS ₂	reibungs- und verschleißmindernd, Zähigkeitssteigernd
Silber	Erhöhung der thermischen Leitfähigkeit
Cu-Sn-Legierungen	Erhöhung der thermischen Leitfähigkeit

Tab. 1: Vergleich einiger Füll- und Verstärkungsstoffe für Kunststoffe

Durch eine Faserverstärkung bei Thermoplasten lassen sich die Festigkeiten deutlich erhöhen. Bei thermoplastischen Kunststoffen kommen im wesentlichen Aramid-, Glas- und Kohlenstofffasern zum Einsatz. Letztere weisen gegenüber Glasfasern eine deutlich höhere Festigkeit auf.

In Bezug auf die tribologischen Eigenschaften wirken Kohlenstofffasern nicht so abrasiv wie Glasfasern und sind unter gleitender Beanspruchung erheblich effektiver in der Erhöhung der Verschleißfestigkeit [Voß-87].

Glasfaserverstärkte Zähne rufen auch an den Gegenflanken eines Stahlzahnrades Verschleiß hervor [ScKo-79]. Ein Nachteil der Kohlenstofffasern ist der höhere Preis gegenüber den Glasfasern. Standardkohlenstofffasern sind heute noch um den Faktor 10 bis 15 teurer als die sehr kostengünstige Glasfaser [FIZiRo-96].

Aramidfaserverstärkte Thermoplaste bieten bei Gleitanwendungen hohe eigene Abrieb- und Verschleißfestigkeit sowie eine kaum feststellbare abrasive Wirkung auf den Reibpartner und gleichmäßig niedrige Reibzahlen [KeSc-86]. Aramidfasern haben von allen Verstärkungsfasern die beste Schmierwirkung [Lubr].

Beim Einsatz von Verstärkungsfasern ist zu beachten, dass die Komponenten auch unter Belastung einen einheitlichen Verbundwerkstoff bilden. Die Reißdehnungen müssen aufeinander abgestimmt sein. So zeigte sich z.B. in [KeSc-86], dass bei Polyamiden die mechanischen Eigenschaften durch Aramidfaserverstärkung erheblich verbessert werden. Dagegen konnten bei Polybutylenterephthalat (PBT), Polypropylen (PP), Polystyrol (PS) und Polycarbonat (PC) keine Verbesserungen erzielt werden, weil bei diesen Kunststoffen die Reißdehnungen nicht aufeinander abgestimmt sind.

Mit Trockenschmierstoffen lassen sich die Verschleiß- und Reibungseigenschaften eines Kunststoffes deutlich optimieren. Durch Zusätze von geeigneten Füllstoffen kann der Reibungskoeffizient und damit die Erwärmung des trockenlaufenden Zahnrades verringert werden. Bei der Auswahl von Menge und Art des Füllstoffes ist zu beachten, dass viele Zusätze neben einer Verbesserung der tribologischen Eigenschaften zu einer Verschlechterung der mechanischen Eigenschaften führen können.

Bei Leistungsgetrieben hat sich mit Kreide modifiziertes POM (z.B. C9021K von TICONA [Tic-97]) bewährt. Auch der Zusatz von Silikon oder Öl-/Graphitkombinationen als innere Schmiermittel verbessert schon bei geringen Konzentrationen das Gleit- und Abriebverhalten. Die Kombination PTFE mit Silikon bietet gerade bei hohen Gleitgeschwindigkeiten enorme Verbesserungen der tribologischen Eigenschaften. Auch Polyäthylen (PE) verringert den Reibungskoeffizienten bei Thermoplasten.

Eine Zugabe von PE zu POM macht POM allerdings so porös, dass diese Kombination nicht für Zahnräder geeignet ist [Centr-97].

Diese Auswirkungen der Füll- und Verstärkungsstoffe auf das grundsätzliche tribologische Verhalten von Kunststoffen sind teilweise dem Standardwerk zur Kunststofftribologie von UETZ und WIEDEMEYER [UeWi-84] zu entnehmen. Da tribologische Kennwerte aber Systemeigenschaften sind, können diese nur unter Einschränkungen auf Kunststoffzahnräder übertragen werden. Sie dienen aber als Orientierung für das tribologische Verhalten der verschiedenen Kunststoffe. Dies gilt auch für die Datenbanken CAMPUS [Camp-98], KERN RIWETA [Kern-98] und andere Standardwerke der Kunststofftechnik (z.B. von SAECHTLING [Sae-92]) die vor allem allgemeine Kennwerte zu Kunststoffen angeben.

1.2.3 Kunststoffzahnräder

Im Folgenden wird ein Überblick zum Stand des Wissens über Kunststoffzahnräder gegeben.

Fremdschmierung

Ein schmierungsfreier Betrieb ist bei Kunststoffzahnradern grundsätzlich möglich, eine Schmierung kann aber die Tragfähigkeit wesentlich erhöhen. Es wird zwischen externer (von außen) und interner (im Kunststoff) Schmierung unterschieden. Als

externe Schmierungsmedien kommen Öl, Wasser, Emulsion oder Fett in Betracht. Ein häufiger Vorteil der internen und der Fettschmierung gegenüber der Öl-, Wasser- oder Emulsionsschmierung ist der verringerte konstruktive Aufwand durch geringere Dichtheitsanforderungen an das Getriebegehäuse.

KLEIN [Klein-67] zeigte, dass mit einer einmaligen Fettschmierung gute Lebensdauerwerte erreichbar sind. Es ist eine deutliche Steigerung der Tragfähigkeit gegenüber dem trockenlaufenden Betrieb zu verzeichnen. Allerdings sind die Umfangsgeschwindigkeiten begrenzt.

Die Steigerungsmöglichkeiten der Tragfähigkeit durch die Ölschmierung werden durch Abb.2 verdeutlicht. Bei der Ölschmierung kommt zu dem eigentlichen Schmierungseffekt noch der positive Effekt der verbesserten Wärmeabführung durch das Öl hinzu.

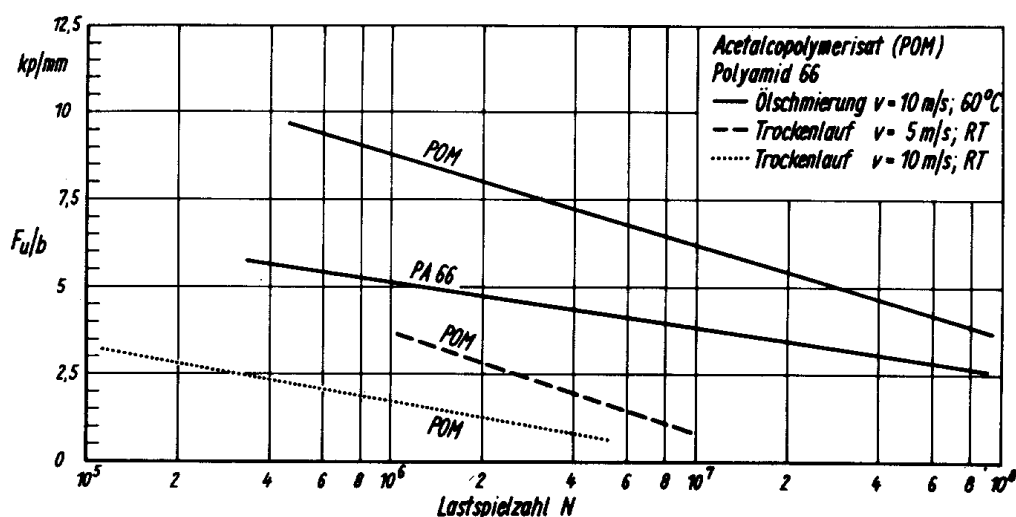


Abb. 2: Vergleich Ölschmierung - Trockenlauf, Modul $m = 3 \text{ mm}$ [BeSi-73]

Trockenschmierstoffe (interne Schmierung)

Auch die Möglichkeit zur Tragfähigkeits- und Verschleißoptimierung unter Verwendung von Trockenschmierstoffen wurde bereits untersucht.

HEYM [Heym-97] stellte bei der trockenlaufenden Paarung Kunststoff/Stahl mit PA66+10%PE eine höhere maximale Belastbarkeit durch die verringerte Reibleistung, aber auch eine geringere Lebensdauer wegen der geringeren Werkstofffestigkeit gegenüber unmodifiziertem PA66 fest. Bei POM wurde durch die Zugabe von PTFE eine höhere maximale Belastbarkeit festgestellt.

Bei den Untersuchungen von HEYM [Heym-97] mit PA66+MoS₂ für trockenlaufende Kunststoff/Stahl Paarungen zeigten sich kaum Verbesserungen in der Tragfähigkeit. HACHMANN und STRICKLE [HaSt-69] stellten für die Paarung Kunststoff/Stahl bei unmodifiziertem PA66 einen geringeren Verschleiß als bei PA66+MoS₂ fest. Dies zeigt, dass MoS₂ bei Polyamiden im Zahnradbereich nicht zum Erfolg führt.

Zusammenfassend kann aber gesagt werden, dass im trockenlaufenden Betrieb durch eine geschickte Wahl der Trockenschmierstoffe, wie bei POM+PTFE, eine Erhöhung der maximalen Belastbarkeit möglich ist.

Neue Werkstoffe

PA und POM sind nach TSUKAMOTO [Tsuk-95] mit über 85% die zur Zeit am meisten verwendeten Kunststoffe bei Zahnrädern. Besonders bei Leistungsgetrieben erwiesen sie sich als den anderen (in Getrieben verwendeten) Zahnradkunststoffen (z.B. Polycarbonat, Polyäthylen) überlegen.

Durch die Entwicklung von neuen Kunststoffen erschließen sich immer neue Forschungspotentiale für Kunststoffzahnräder. HEYM [Heym-97] untersuchte das Hochtemperaturthermoplast PEEK sowie modifizierte und unmodifizierte Polyamide und Polyacetale im Trockenlauf in Paarung mit Stahlzahnradern. PEEK erreicht trotz seiner hervorragenden Hochtemperaturbeständigkeit keine erhöhten Lebensdauerwerte gegenüber POM im trockenlaufenden Betrieb. Nur bei erhöhten Umgebungstemperaturen ist die Tragfähigkeit von Zahnrädern aus PEEK dem Werkstoff POM überlegen. Eine eindeutige Erklärung für dieses Verhalten konnte im Rahmen von HEYMs Arbeit nicht gefunden werden.

Verstärkungsfasern

Auch der Einfluss von verschiedenen Verstärkungsfasern auf die Tragfähigkeit und den Verschleiß bei Kunststoffzahnradern wurde schon vielfach untersucht.

So zeigte SIEDKE [BeSi-73] [Sied-77], dass bei glasfaserverstärkten Polyamiden eine Erhöhung der Tragfähigkeit im ölgeschmierten Betrieb möglich ist. Im trockenlaufenden Betrieb trat dagegen bei Glasfasern, aufgrund ihrer abrasiven Wirkung, auch mit zusätzlichen Trockenschmierstoffen sehr hoher Verschleiß mit folgenden Anrissen bei Polyamid auf [Heym-97]. Kohlenstofffaserverstärkte Polyamide werden seit längerem als Zahnradwerkstoffe bei Ölschmierung eingesetzt (siehe [CrDa-93], [She-79]). CRIPPA und DAVOLI [CrDa-92] bewiesen, dass die Belastbarkeit des kohlenstofffaserverstärkten PA6 bei Ölschmierung generell höher ist als bei dem unmodifizierten PA6. Wie sich die weniger abrasiven

Kohlenstofffasern bei trockenlaufenden Zahnrädern verhalten, ist bisher kaum erforscht. Auch der Einfluss der wenig abrasiven und gut gleitenden Aramidfaser wurde noch wenig bei Zahnrädern untersucht. Nur HEYM [Heym-97] zeigte in Stichprobenversuchen anhand von PA66 mit Aramidfasern, dass diese Fasern zu guten Tragfähigkeiten im trockenlaufenden Betrieb führen können (siehe auch Kap. 5.1.5).

Verzahnungsformen

FAATZ [FEE1-98], [FEE2-98] untersuchte Hybridverzahnungen in der Feinwerktechnik. Dabei wurde der Zahnfuß optimiert, eine Einlaufkurve vorgesehen, um Teilungsfehler im Eingriff zu kompensieren und eine aktive Zykloide zur Steigerung des Überdeckungsgrades eingeführt. Die gewählte Hybridverzahnung verbessert die Laufeigenschaft, während sich die Belastungsfähigkeit aufgrund der größeren Zahnhöhe und der daraus resultierenden erhöhten Biegemomente gegenüber der DIN-Verzahnung verringert.

BAUMGART [Baum-92] stellte bei seinen Untersuchungen mit einem Komplementprofil (20% vergrößerte Zahndicke des Kunststoffzahnrades) zwar teilweise längere Laufzeiten fest, die höhere Streubreite deutet aber auf ein höheres Ausfallrisiko hin.

Bei Leistungsgetrieben kommt ausschließlich die Evolventenverzahnung zur Anwendung [Tic-97]. Im Gegensatz zu Stahlzahnrädern ist bei Kunststoffzahnrädern die Steigerung der Tragfähigkeit durch eine Schrägverzahnung nicht gesichert, da es oft zu einem Wegbrechen der Zahnraddecken kommt.

Ein größerer Eingriffswinkel ermöglicht einen geringeren Verschleiß und einen geometrisch stärkeren Zahnfuß und erhöht damit die Tragfähigkeit [WaWhWe-98], [WaWhWe-99]. Im Vergleich zu Zahnrädern aus Stahl ist die erzielbare Tragfähigkeitssteigerung mittels Vergrößerung des Eingriffswinkels bei Kunststoffzahnrädern geringer, da sich der Überdeckungsgrad durch Zahnverformung unter Aufbringung von Last vergrößert [Klein-67], [CoBu-70].

Umgebungstemperaturen

Mit der Temperatur ändern sich die mechanischen und tribologischen Eigenschaften der Thermoplaste. Über den Einsatz von Kunststoffzahnrädern bei sehr hohen Umgebungstemperaturen (über 100°C) liegen kaum Erkenntnisse vor. Die bisherige obere Einsatzgrenze von Kunststoffzahnrädern liegt bei ca. 80°C [TuMe-91] bzw. 100°C [She-79]. TSUKAMOTO und Mitarbeiter [TMTN-91] zeigten erwartungsgemäß

eine Abnahme der Belastbarkeit bei trockenlaufenden Polyamidzahnradern mit steigender Temperatur. Diese maximale Einsatztemperatur könnte sich durch den Einsatz neuer hochtemperaturbeständiger Thermoplaste erhöhen lassen. So zeigte HEYM [Heym-95], dass mit PEEK bei 140°C (ein Bereich bei dem POM nicht mehr als Zahnradwerkstoff einsetzbar ist) im trockenlaufenden Betrieb gute Tragfähigkeiten möglich sind. Wie sich dieser Werkstoff bei Schmierung unter hohen Temperaturen verhält, ist nicht bekannt (dazu siehe Kap. 5.1.3).

Auch über das Verhalten von Kunststoffgetrieben bei niedrigen Temperaturen sind keine Forschungsergebnisse bekannt.

Werkstoffkombinationen

Alle vorangegangenen Untersuchungen bestätigen, dass die Paarung Kunststoff/Stahl bei Trockenlauf, Fett- und Ölschmierung wegen der besseren Wärmeableitung des Stahlzahnrades für höhere Leistungen als Kunststoff/Kunststoff-Stirnradpaarungen geeignet ist.

Werden gleiche Kunststoffe miteinander gepaart, ergibt sich meist ein hoher Verschleiß. So ergibt sich die Empfehlung, stets ungleiche Kunststoffe miteinander zu paaren (siehe dazu [RöTe-00]).

Geräuschreduzierung

Ein wesentlicher Vorteil bei Kunststoffzahnradern ist die Reduzierung von Stößen und Geräuschen. Für eine weitere Verringerung der Geräuscentwicklung kann die Geometrie verändert oder ein noch elastischerer Kunststoff verwendet werden.

Durch eine geeignete Einlaufkurve im Zahnkopf kann der Eingriffsstoß und damit die Geräuscentwicklung verringert werden. Eine nachgiebige Gestaltung der Zahnräder, z.B. mit hohen schlanken Zähnen, führt ebenfalls zu einer Geräuschreduzierung.

Durch den Einsatz weicherer Kunststoffe, z.B. mittels Schlagzähmodifizierung, werden die Eingriffsstöße weniger hart und damit die Geräusche reduziert. Eine weitere Möglichkeit zur Geräuschminimierung bietet die Verwendung von Polyamid-Elastomer-Mischungen, wie TSUKAMOTO und Mitarbeiter [TMI-91-2] zeigten .

Auslegungsrichtlinien

Eine der ersten Forschungsarbeiten zu Kunststoffzahnradern wurde von HACHMANN und STRICKLE [HaSt-66] veröffentlicht. Sie stellten anhand einer Wärmebilanz eine Gleichung zur Berechnung der Zahntemperatur auf. Nachteil der

Gleichung ist, dass einige Parameter in Laufversuchen experimentell bestimmt werden müssen.

Schon REMSHARDT [Rems-65], KLEIN [Klei-67] und BUDICH [Budi-69] stellten bei ihren Untersuchungen mit Polyoxymethylen (POM) und Polyamid (PA) gepaart mit einem Stahlrad bei Öl-, Fett-, und Wasser-Ölemulsionsschmierung fest, dass eine Trennung in Zeit- und Dauerfestigkeit bei thermoplastischen Kunststoffzahnradern nicht möglich ist.

Wichtige Auslegungshinweise für thermoplastische Kunststoffzahnradern sind in der VDI - Richtlinie 2545 [VDI-2545] und in den Richtlinien von TICONA [Tic-97] und DUPONT [Dupo-97] enthalten. Sie beruhen alle auf experimentellen Zahnradversuchen. Ein Vergleich der verschiedenen internationalen Auslegungs- und Berechnungsstandards für Kunststoffzahnradern ist von DAVOLI [DaCo-94] verfasst worden. Weitere Auslegungs- und Gestaltungsgrundlagen wurden von KRAUSE [Krau-85] erarbeitet. Ausgehend von den Ergebnissen der VDI-2545 und neueren Arbeiten erstellte die Firma KISSsoft [Kiss-98], [Eber-98] ein Auslegungsprogramm für Kunststoffzahnradern. Alle Richtlinien zeigen, dass die Tragfähigkeit der Kunststoffzahnradern lediglich abgeschätzt werden kann. Über die Tragfähigkeit von Zahnradern aus neuen Kunststoffen sind kaum Aussagen möglich.

1.3 Ziel der Arbeit

Untersuchungsschwerpunkt dieser Arbeit sind hochbelastete Kunststoffzahnradern.

Dabei sollen aus der Vielzahl der verfügbaren Kunststoffe diejenigen ermittelt werden, die für den Einsatz im trockenlaufenden Betrieb in Paarung mit Stahlzahnradern den bisher verwendeten Kunststoffen in Tragfähigkeit und Verschleiß überlegen sind. Zusätzlich zu den Tragfähigkeitskennwerten sind Verschleiß- und Kriechformungen, der Wirkungsgrad, die Erwärmung der Kunststoffzähne und die Geräuschentwicklung zu dokumentieren. Vorrangiges Ziel ist die Steigerung der übertragbaren Leistung und die Verminderung der Übertragungsverluste bei Kunststoffgetrieben, um ihnen neue Einsatzfelder zu erschließen. Dabei wird überwiegend die Eignung verschiedener Werkstoffe mit entsprechenden Füll- und Verstärkungsstoffen für festgelegte Betriebsbedingungen betrachtet.

Weiterhin werden Tragfähigkeitsuntersuchungen an ölgeschmierten Zahnradern aus Hochtemperaturthermoplasten bei erhöhten Ötemperaturen (120°C) durchgeführt.

Bei diesen Kunststoffen handelt es sich um unverstärkte, verstärkte und tribologisch optimierte Hochtemperaturthermoplaste. Da die normalen Standardkunststoffe bei diesen hohen Temperaturen als Zahnradwerkstoff nicht geeignet sind, sollen mit Hilfe dieser Untersuchungen neue Potentiale für thermoplastische Kunststoffzahnräder aufgezeigt werden. Ein mögliches Einsatzgebiet wäre vor allem die Nebenaggregate im Automobilbau, z.B. der Antrieb von Wasserpumpen oder Lichtmaschinen.

Eine realitätsnahe Ermittlung der Belastungs-, Verlust-, und Verschleißkennwerte wird durch Versuche auf Zahnradprüfständen erreicht.

1.4 Aufbau der Arbeit

In Kapitel 1 wurde der Stand der Forschung auf dem Gebiet der Kunststoffzahnräder und der dafür relevanten Kunststoffe dargestellt und daraus die Ziele für diese Arbeit abgeleitet. Anschließend werden in Kapitel 2 aus den Anforderungen und Ergebnissen vorangegangener Forschungsarbeiten geeignete Kunststoffe zur Verbesserung von Tragfähigkeit, Wirkungsgrad und Verschleiß ausgewählt. Danach geben Kapitel 3 und 4 die erforderlichen Informationen zu den verwendeten Versuchszahnrädern, -parametern und -einrichtungen. Die ermittelten Versuchsergebnisse werden in Kapitel 5 dargestellt, um sie anschließend in Kapitel 6 zu interpretieren. Im 7. Kapitel werden die Tragfähigkeitskennwerte mit den Werten nach der VDI-Richtlinie 2545 verglichen. Alle diese Ergebnisse und Erfahrungen werden in Anwendungshinweisen für den Konstrukteur in Kapitel 8 zusammengefasst.

Ein Resümee über die gesamte Arbeit und damit einen Ausblick für weitere Forschungsarbeiten gibt Kapitel 9.

2 Kunststoffauswahl

Zur Auswahl geeigneter Werkstoffe für höher beanspruchte Kunststoffzahnräder waren zunächst die Anforderungen, welche sich aus den zahnradspezifischen Gegebenheiten ergeben, zu beachten. Anschließend wurden hiermit und durch Analyse der Ergebnisse vorangegangener Untersuchungen zu Kunststoffzahnradern die werkstofflichen Anforderungen weiter spezifiziert.

2.1 Anforderungen an den Werkstoff

Es ist sehr schwierig, aus den statischen Werkstoffeigenschaften Rückschlüsse auf das dynamische Verhalten von Kunststoffzahnradern zu ziehen.

Schon REMSHARDT [Rems-65] stellte fest, dass statische Festigkeitswerte keinen eindeutigen Schluss auf das dynamische Verhalten im Zahnradbau zulassen. Es können aber unverzichtbare Anforderungen für Kunststoffzahnräder und deren Optimierung formuliert werden. Ob die angestrebten Optimierungen zum Erfolg führen, kann erst der Versuch am Zahnrad zeigen. HEYM [Heym-97] stellte hierzu eine Anforderungsliste an die Werkstoffeigenschaften für trockenlaufende Kunststoffzahnräder auf (Tab. 2). Die genannten Anforderungen sind vielfältig und widersprechen sich sogar teilweise. So bestimmen Elastizitätsmodul und Dämpfung im Übertragungsverhalten sowohl die Laufruhe als auch die Verluste, wirken aber jeweils entgegengesetzt. Daher muss für jeden Einzelfall entschieden werden, welche Wirkung vorrangig erreicht werden soll.

Da die vorliegenden Untersuchungen lediglich erste Einblicke zu Tragfähigkeit, Wirkungsgrad und Verschleiß bei konstanten, trockenen und temperierten Betriebsbedingungen geben sollen, konnten die Anforderungen an die Strahlungsbeständigkeit, chemisch-physikalische Stabilität und die Feuchteaufnahme im Rahmen dieser Arbeit außeracht bleiben. Konkrete Aussagen zur Temperaturabhängigkeit der Dämpfungseigenschaften für konkrete Kunststoffe sind sehr selten zu finden. Die in dieser Arbeit berücksichtigten Anforderungen an trockenlaufende Kunststoffzahnräder wurden deshalb auf die mechanischen und tribologischen Eigenschaften beschränkt.

Zur genaueren Kennzeichnung der relevanten Eigenschaften werden im Folgenden die aufgetretenen Zahnradschäden vorangegangener Untersuchungen betrachtet.

Merkmal	Anforderung	Werkstoffkennwert	Wirkung
Beanspruchung	hohe statische und dynamische Festigkeit	Streckgrenze, Biegefestigkeit, Zeitfestigkeitswerte etc.	Hohe Tragfähigkeit, hohe Lebensdauer
Beanspruchungsgeschwindigkeit	duktils Verhalten	Schlagzähigkeit, Bruchdehnung	Stoßunempfindlichkeit
Beanspruchungsdauer	geringes Kriechen	Kriechmodul	Maßhaltigkeit, Erhalt der Lastverteilung ⁴⁾
	geringer Verschleiß	[Verschleißangabe] ¹⁾	Maßhaltigkeit, Erhalt der Lastverteilung ⁴⁾
Temperatur	geringe Wärmedehnung	Wärmedehnungskoeffizient	Maßhaltigkeit (Flanken-, Kopfspiel)
	hohe Warmfestigkeit	Formbeständigkeit ³⁾	Maßhaltigkeit
Übertragungsverhalten	hohe Laufruhe	Elastizitätsmodul ↓	Bessere Lastverteilung ⁴⁾ Geringere Hertzsche Pressung
		Dämpfungsdekrement ↑	Stoß-, Schwingungsdämpfung
	geringe äußere Reibungsverluste	[Reibkoeffizienten] ¹⁾	Höherer Wirkungsgrad Geringere Temperatur Geringere Reibungskräfte auf der Zahnflanke
	geringe innere Reibungsverluste	Dämpfungsdekrement ↓	Höherer Wirkungsgrad Geringere Temperatur Geringere innere Kräfte
	geringe Speicherarbeit	Elastizitätsmodul ↑	Geringere Verluste, geringere Verformung
Feuchtigkeit	geringe Wasseraufnahme	Wasseraufnahme im Normalklima	Maßhaltigkeit; Werkstoffkennwerte
Strahlung	hohe Beständigkeit	[Grenzdosis] ²⁾	Werkstoffkennwerte
Chemisch physikalische Stabilität	hohe Beständigkeit (Lösungsmittel, Oxidation)	[Beständigkeit, Abbaurate ²⁾]	Maßhaltigkeit; Werkstoffkennwerte
¹⁾ Angaben nur systemspezifisch möglich ²⁾ Angaben nur in Sonderfällen ³⁾ Temperaturabhängigkeit ist bei allen Kennwerten zu beachten ⁴⁾ Im Doppeleingriff			

Tab. 2: Anforderungen an Kunststoffe für trockenlaufende Zahnräder [Heym-97] (↓ fallend, ↑ steigend)

2.2 Schadensanalyse vorangegangener Untersuchungen an Kunststoffzahnradern

Anhaltspunkte über erfolgversprechende Werkstoffe und geeignete Prüfbedingungen können mittels einer Analyse der Eigenschaften bewährter Zahnradwerkstoffe und der dazugehörigen früheren Zahnraduntersuchungen gewonnen werden. Hiermit lassen sich Schlüsse darüber ziehen, welche relevanten Eigenschaften der Kunststoff bei den jeweiligen Einsatzbedingungen besitzen sollte und welche Werkstoffkennwerte als nicht ausschlaggebend angesehen werden können. Die Analyse wurde hier anhand der Schäden und bei definierten Versuchsbedingungen

an Zahnrädern aus Thermoplasten mit unterschiedlichen Materialeigenschaften durchgeführt. Fällt ein Werkstoff bei den bekannten Einsatzbedingungen beispielsweise nur durch Zahnfußbruch ohne thermisches Versagen aus, so ist eine Steigerung der Biegefestigkeit bei ähnlichen oder eventuell besseren Reibungseigenschaften anzustreben. Für die angestrebten Einsatzbedingungen lässt sich damit der geeignete Werkstoff zielgerichteter auswählen als ohne die früheren Versuchserfahrungen.

Kunststoffe und Kunststoffpaarungen, welche sich bisher im Laufe von Untersuchungen unter ähnlichen Versuchsparametern nicht bewähren konnten, wurden im Rahmen der Arbeit für weitere Untersuchungen ausgeschlossen.

Um Potentiale zur Vermeidung von Schäden bei Kunststoffzahnradern aufdecken zu können, wurden die bekannten Schädigungen mit ihren Ursachen im Folgenden zusammengestellt.

• **Anschmelzungen**

Überschreitet die Zahnflankentemperatur die Schmelztemperatur des Werkstoffes kommt es zu Anschmelzungen. Den Kunststoffzahnradern wird mehr Wärme zu- als abgeführt. Dadurch wird keine stationäre Zahntemperatur erreicht. Die Zahntemperatur steigt stattdessen stetig. Aufgrund der Temperaturzunahme im Kunststoffzahn nehmen die mechanischen Festigkeiten stetig ab, bis sie für eine Kraftübertragung zu gering sind. Die Zähne erweichen oder werden innerhalb kürzester Zeit weggedrückt.

• **Zahnbruch an der Fußausrundung**

Bei zu geringer Biegefestigkeit des Kunststoffzahnes kommt es zum Biegebruch außerhalb der Verschleißrinne, dort wo die Flanke nicht mit der Gegenflanke in Kontakt kommt.

• **Zahnflankenbruch**

Bei Überlagerungen von zu hohen Schub- und Hertzschen Spannungen beim Kontakt mit der Gegenflanke kommt es im aktiven Zahnfußbereich (Bereich der mit der Gegenflanke in Kontakt kommt) zur Rissbildung. Der Riss schreitet aufgrund der zyklischen Biegespannungen weiter fort, bis die wirksame Biegespannung über der ertragbaren Biegespannung liegt.

- **Hoher Verschleiß**

Der Verschleiß an der Zahnflanke entsteht durch Abrieb und durch Abplatzungen. Der Abrieb ist meist an Zahnfuß und Zahnkopf, wo die höchsten Gleitgeschwindigkeiten auftreten, am größten. Weiterhin ist der Verschleiß bei der Paarung gleicher Kunststoffe miteinander besonders groß. Da für diese Arbeit nur tribologisch hochwertige Kunststoffe in der Paarung Kunststoff/Stahl ausgewählt wurden, ist es nicht überraschend, dass kein hoher Verschleiß festgestellt wurde.

- **Grübchenbildung**

Grübchenbildung ist die Folge einer Ermüdung des Werkstoffes im oberflächennahen Bereich. Für die Ermüdung des Werkstoffes sind die Hertzschen Pressungen die wesentlichen Ursachen. Aber auch die Schubspannungen und die Temperaturwechselspannungen infolge des Gleitens der Flanken bilden wirksame Anteile [Linke-96].

Bei gleicher Verzahnungsgeometrie ist die anliegende Flankenpressung (Hertzsche Pressung) hauptsächlich von dem E-Modul des Kunststoffrades abhängig. Je höher das E-Modul umso stärker sind die sich ergebenden Flankenbeanspruchungen.

Die Grübchenbildung ist bei gleicher Geometrie überwiegend vom untersuchten Kunststoff und der sich jeweils ergebenden Zahntemperatur abhängig.

Tabelle 3 verdeutlicht noch einmal das Anliegen dieses Kapitels. Anhand der Schäden und deren Ursachen wurden Vorschläge zur Abhilfe genannt. Die konkreten Werkstoffbeispiele aus den Untersuchungen geben qualitative Hinweise zu den relevanten Werkstoffkenngrößen. Fällt beispielsweise ein Zahnrad aus POM im trockenlaufenden Betrieb durch Anschmelzungen aus, so können diese Anschmelzungen verringert oder vermieden werden, indem ein Werkstoff mit geringerem Reibungskoeffizienten und/ oder höherer Schmelztemperatur als POM (bei gleichen Betriebsbedingungen) gewählt wird. Natürlich dürfen die anderen, auch möglichen Zahnradschäden nicht außeracht gelassen werden. So ist bei dem genannten Beispiel auf eine ausreichende Biegefestigkeit zu achten.

Schaden	Ursache	Abhilfe
Anschmelzungen	zu starke Erwärmung der Zahnflanken	Verringerung der Verlustleistung und/ oder Erhöhung der Schmelztemperatur des Kunststoffes
Zahnfußbruch	zu geringe Biegefestigkeit	Erhöhung der Biegefestigkeit (z.B. durch Verstärkungsfasern)
Grübchenbildung	zu hohe Hertzsche Pressung mit überlagerter Schubspannung	geringerer E-Modul
hoher Verschleiß	geringe Verschleißfestigkeit oder starke abrasive Wirkung des Reibpartners	höhere Verschleißfestigkeit oder Partner mit geringerer abrasiver Wirkung
Zahnbruch an der Flanke	Rissbildung durch Hertzsche Pressungen und Schubspannungen an der Verschleißzone, durch Biegebeanspruchung wachsen des Risses bis zum Bruch	Verringerung der Schubspannungen durch geringere Reibungskoeffizienten, verbesserte Verschleißigenschaften

Tab. 3: Schäden, Ursachen und deren Vermeidungsmöglichkeiten bei Kunststoffzahnradern

Zur Beschreibung der vorangegangenen Untersuchungen wurden die wichtigsten Kenndaten für thermoplastische Kunststoffzahnradern herangezogen (nach [VDI-2545]).

- Diese sind:
- Teilkreisgeschwindigkeit v_t ,
 - Umgebungstemperatur T_u ,
 - Modul m ,
 - Zähnezahl z_1, z_2 und
 - Linienlast F_t/b (Tangentialkraft/Zahnbreite).

Im Hinblick auf die Auswahl besserer trockenlaufender Kunststoffzahnradern wurden besonders die Kunststoffe analysiert, die aufgrund ihrer Eigenschaften vorwiegend für Kunststoffzahnradern eingesetzt werden und unter den in Tab. 4 aufgezeigten Betriebsbedingungen zu den genannten Schäden führten.

Kunststoff	Werkstoff -bez./ -zusätze	Prüfbedingungen (Umfangsgeschwindigkeit v , Umgebungstemperatur T , Modul m , Lastbereich F_t/b , Zähnezahlen z_1, z_2)	Ver- sagens- art	Quelle
PA66	Utramid A4	$v_t = 5$ m/s; $T_u =$ Raumtemperatur; $m = 3$ mm; $F_t/b = 20$ N/mm, $z_1 = 33, z_2 = 31$	Zahn- flanken- bruch	[Sied-77]
PA66	Utramid A4	$v_t = 7,5$ m/s; $T_u =$ Raumtemperatur; $m = 2$ mm; $F_t/b < 17$ N/mm; $z_1 = 22, z_2 = 31$	Zahn- flanken- bruch	[Heym-97]
PA66	Utramid A4	$v_t = 7,5$ m/s; $T_u =$ Raumtemperatur; $m = 2$ mm; $F_t/b > 17$ N/mm; $z_1 = 22, z_2 = 31$	An- schmelz- ungen	[Heym-97]
POM	keine Angabe	$v_t = 10$ m/s; $T_u =$ Raumtemperatur ; $m = 3$ mm, $F_t/b = 20-30$ N/mm; $z_2 = 31$, $z_1 = 31$	Zahn- flanken- bruch	[Mart-87]
POM	Hostaform C	$v_t = 7,5$ m/s; $T_u =$ Raumtemperatur; $m = 2$ mm; $F_t/b < 20$ N/mm; $z_1 = 22, z_2 = 31$	Zahn- flanken- bruch	[Heym-97]
POM	Hostaform C	$v_t = 7,5$ m/s; $T_u =$ Raumtemperatur; $m = 2$ mm, $F_t/b > 22$ N/mm; $z_1 = 22, z_2 = 31$	An- schmelz- ungen	[Heym-97]
POM	Hostaform C9020	$v_t = 10$ m/s; $T_u =$ Raumtemperatur; $m = 3$ mm; $F_t/b = 20$ N/mm, $z_1 = 33, z_2 = 31$	Zahn- flanken- bruch	[Sied-77]
POM	22%PTFE	$v_t = 7,5$ m/s; $T_u =$ Raumtemperatur; $m = 2$ mm ; $F_t/b < 40$ N/mm; $z_1 = 22, z_2 = 31$	Zahn- bruch an der Fuß- rundung	[Heym-97]

Tab. 4: Vergleich der Zahnradschäden an trockenlaufenden Kunststoffzahnradern aus vorangegangenen Untersuchungen

Die Zahnräder aus POM und PA versagten größtenteils durch Zahnflankenbruch an der aktiven Flanke, meist ausgehend von der Verschleißrinne. Daraus ergibt sich der Wunsch nach Werkstoffen mit einem besseren Verschleiß- /Reibungsverhalten und erhöhter Biegefestigkeit.

Bei hohen Lasten traten bei Werkstoffen ohne reibungsmindernde Zusätze (wie PE oder PTFE) Anschmelzungen auf. Somit sollten potentielle Zahnradwerkstoffe geringere Reibungskoeffizienten als die bekannten Kunststoffe mit einer beobachteten Anschmelzlast bei ähnlichen Prüfbedingungen aufweisen. Zahnräder aus Werkstoffen mit geringer Biegefestigkeit (POM+22%PTFE) versagten durch Zahnbruch an der Fußausrundung. Zum Vermeiden von Zahnfußbrüchen bei ähnlichen Prüfbedingungen sind Kunststoffe mit einer höheren Biegefestigkeit als die von POM+22%PTFE zu wählen.

2.3 Auswahl geeigneter Werkstoffe zur Optimierung von Tragfähigkeit, Wirkungsgrad und Verschleiß

Anhand bekannter Schäden im trockenlaufenden Betrieb wurden Werkstoffe ausgewählt, die den aus Tab. 2 abgeleiteten Anforderungen besser entsprechen, als die in Tab. 4 aufgeführten. In den Abb. 3 - 5 werden charakteristische Eigenschaften neuer Werkstoffe den Eigenschaften bereits untersuchter Werkstoffe gegenübergestellt. Für den Vergleich wurden optimierte Werkstoffe mit Aramid- und Kohlenstofffasern sowie PTFE als Füll- und Verstärkungsstoffe gewählt (siehe Kap. 1.2.2). Die Werkstoffe wurden dem Produktkatalog von LNP [LNP] entnommen.

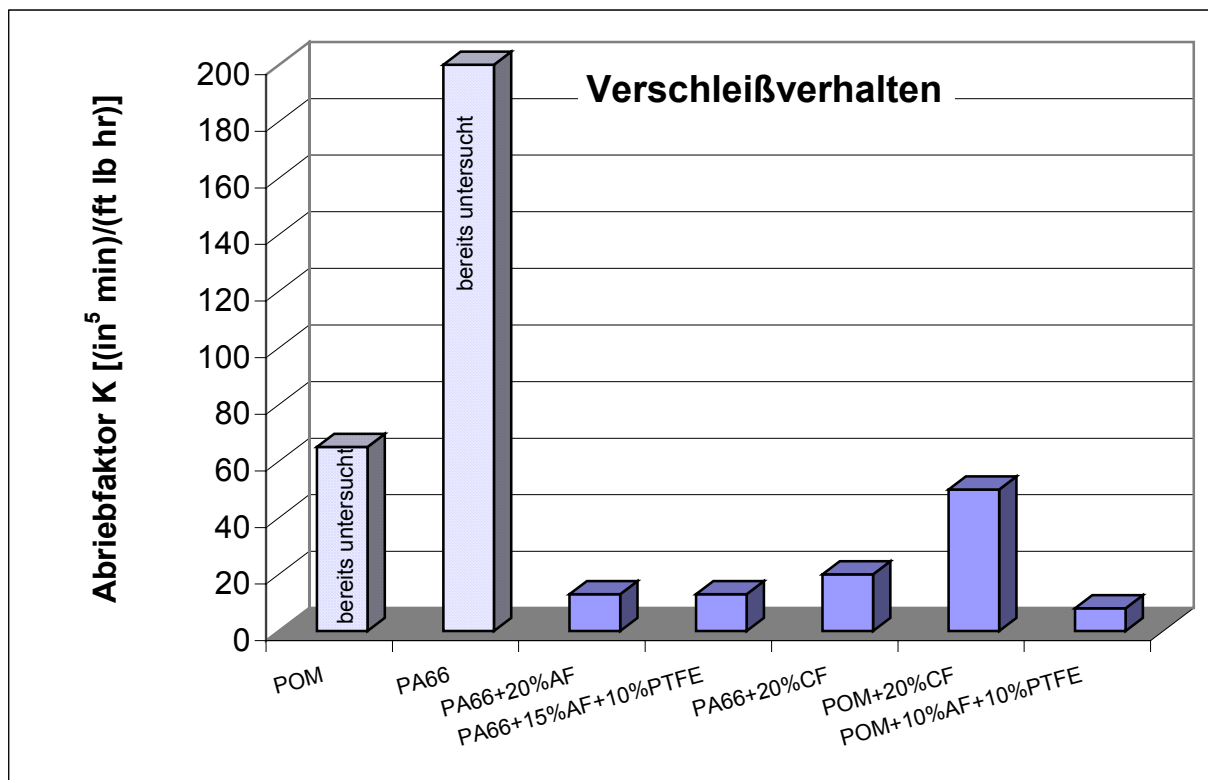


Abb. 3: Vergleich der Abriebfaktoren der bereits untersuchten Werkstoffe (POM und PA66) und der zu untersuchenden Werkstoffe [LNP]

Die für den Vergleich ausgewählten Kunststoffe, die im Rahmen dieser Arbeit untersucht wurden, weisen einen deutlich geringeren Abriebfaktor als die Standardwerkstoffe POM und PA66 auf. Somit wurde der Verschleiß an der Verschleißrinne verringert, wodurch es zur Reduzierung der Anrissneigung kam.

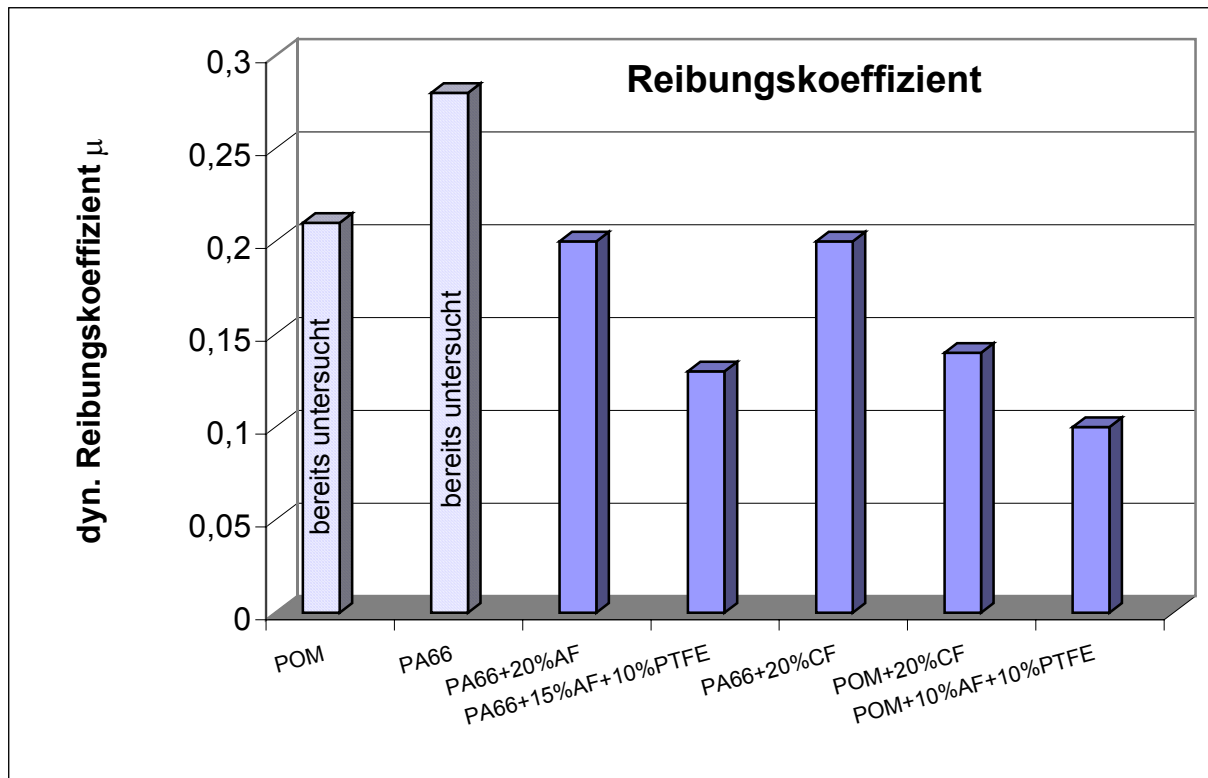


Abb. 4: Vergleich der Reibungskoeffizienten der bereits untersuchten Werkstoffe (POM und PA66) und der zu untersuchenden Werkstoffe [LNP]

Auch der dynamische Reibungskoeffizient der ausgewählten Werkstoffe ist geringer als bei den bisherigen Standardwerkstoffen POM und PA66. Somit ist mit einer Verringerung der Zahntemperatur, einhergehend mit einem geringeren Abfall der Festigkeiten und einer Erhöhung der Anschmelzlast zu rechnen. Weiterhin verringern sich durch den kleineren Reibungskoeffizienten die Schubspannungen an den Zahnradflanken, was die Anrissneigung im aktiven Bereich verringern kann.

Alle ausgewählten Kunststoffe haben gegenüber POM+20% PTFE höhere statische Biegefestigkeiten (Abb. 5). Somit ist mit einer Erhöhung der Zahnfußfestigkeit zu rechnen.

Weitere Werkstoffeigenschaften der ausgewählten Kunststoffe sind dem Anhang (A.2) zu entnehmen. Für die gewählten Kunststoffe ist sowohl mit einer Erhöhung der Anschmelzlast, als auch mit einer Erhöhung der Zeitfestigkeit zu rechnen. Bei den genannten Parametern ist zu beachten, dass es sich dabei um temperaturabhängige Größen handelt und deshalb eigentlich die Werte bei den jeweiligen sich ergebenden Temperaturen im Kunststoffzahn betrachtet werden müssten. Die Temperaturabhängigkeit dieser Größen ist aber aus der Literatur nicht zu entnehmen.

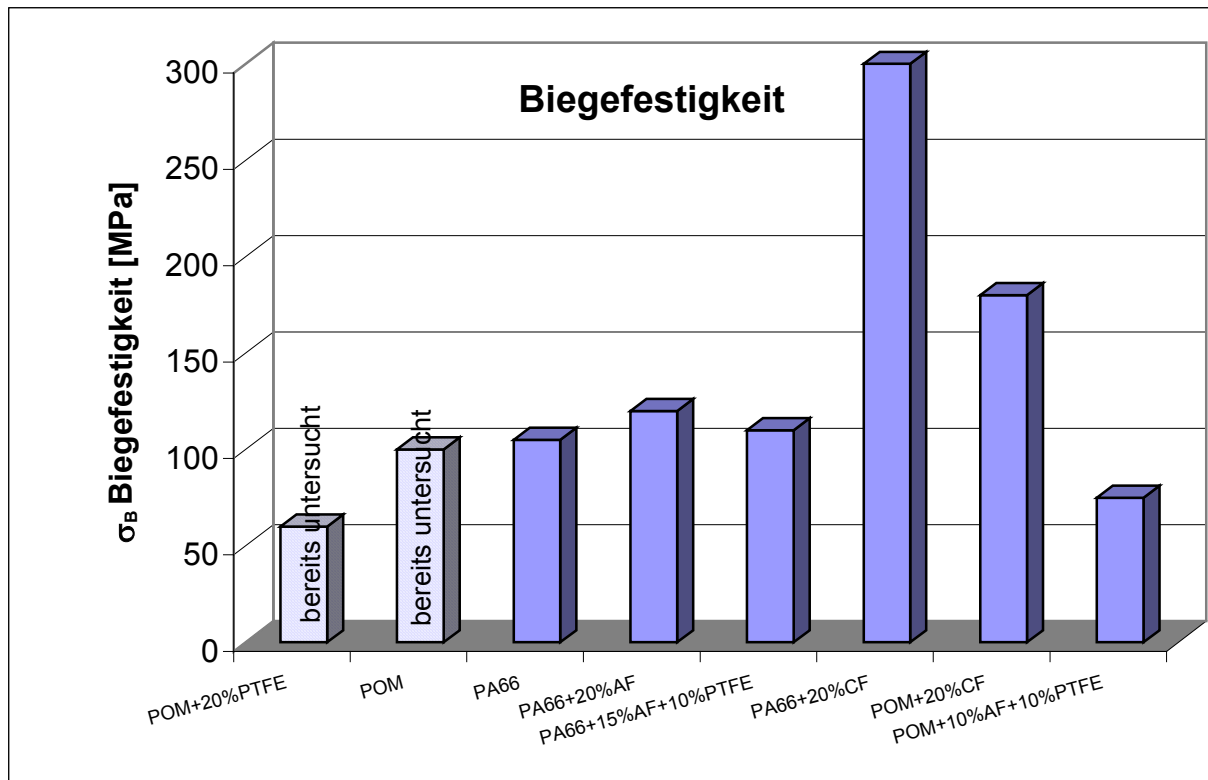


Abb. 5: Vergleich der Biegefestigkeiten σ_B der bereits untersuchten Werkstoffe (POM und PA66) und der zu untersuchenden Werkstoffe [LNP]

Weiterhin handelt es sich bei den tribologischen Kennwerten um Systemparameter, die abhängig vom Tribosystem Abweichungen aufweisen können. Somit geben die gewählten Parameter nur eine Orientierung zur Tragfähigkeitssteigerung. Endgültige Gewissheit kann erst aus dem Zahnradversuch gewonnen werden.

Zusätzlich wurden PA46 und PEEK FC30 für die Untersuchungen an Zahnradern verwendet. Diese Kunststoffe kommen von anderen Herstellern, als die in Abb.3 – Abb.5 genannten Kunststoffe. Die Prüfverfahren für die relevanten Werkstoffparameter sind bei den Herstellern verschieden und damit nicht direkt vergleichbar.

Für den ölgeschmierten Betrieb wurden vom Auftraggeber verschiedene PEEK Kombinationen ausgewählt (siehe Kap. 3.1). Dieser Kunststoff ist besonders für den Einsatz bei hohen Temperaturen geeignet.

3 Versuchszahnräder/ Versuchsparmeter

Inhalt dieses Kapitels sind zum einen die gewählten Kunststoffe mit ihren Zusätzen und die dazugehörigen Eigenschaften. Zum anderen werden die Geometrie, die Verzahnungsqualitäten und die Herstellung der Versuchszahnräder beschrieben. Weiterhin werden die einzelnen Versuchsparmeter näher erläutert. Das Kapitel ist erforderlich, um die Ergebnisse der einzelnen Untersuchungen und die Übertragung der Ergebnisse auf andere Anwendungsfälle besser beurteilen zu können.

3.1 Untersuchte Thermoplaste

Es wurden nur Kunststoffe verwendet, die als Fertigprodukt (Granulat) käuflich erhältlich sind. Eigene Kunststoffmischungen konnten wegen des hohen Fertigungsaufwandes nicht erstellt werden. Wie im ersten Kapitel erläutert, wurden aufgrund ihrer Eigenschaften nur teilkristalline Thermoplaste für die Untersuchungen ausgewählt.

Polyetheretherketon (PEEK)

Hierbei handelt es sich um einen relativ neuen Kunststoff. PEEK ist ein hochtemperaturbeständiger teilkristalliner Thermoplast, der zu der Obergruppe der PAEK (Polyarcyletherketone) gehört. Wesentliche Unterschiede zwischen den einzelnen PAEK treten nach [EDEM-94] nur in den thermischen Kennwerten auf.

Die Steifigkeit und Festigkeit von unverstärktem PEEK liegt höher als bei anderen Thermoplasten [EDEM-94]. Kennzeichnend ist, dass seine guten mechanischen Eigenschaften selbst bei hohen Temperaturen beibehalten werden. Somit ist besonders bei hohen Umgebungstemperaturen eine Überlegenheit in der Tragfähigkeit gegenüber den bisherigen Standardkunststoffen zu erwarten. PEEK besitzt für einen Thermoplast eine sehr hohe Wärmeformbeständigkeit. Weiterhin verfügt es über gute Reibungs- und Verschleißigenschaften. Nachteil dieses Kunststoffes ist der hohe Preis. PEEK wird im Rahmen der Dissertation in unmodifizierter Form (PEEK 450G), mit zusätzlichen Kohlenstofffasern (PEEK CA30) und mit Kohlenstofffasern mit zusätzlichen Trockenschmierstoffen (PEEK FC30) untersucht.

Polyoxymethylen (POM)

POM zeichnet sich durch hohe Kriechbeständigkeit, Steifigkeit und gute mechanische Eigenschaften in einem weiten Temperaturbereich aus. Auch aufgrund seiner guten tribologischen Eigenschaften ist POM ein weit verbreiteter Werkstoff für Kunststoffzahnräder. Wegen seiner sehr geringen Feuchteaufnahme und des hohen mechanischen Festigkeitsniveaus ist POM sowohl als Werkstoff für kleinste, maßhaltige als auch für hochbelastete Zahnräder geeignet. So sind nach WALTON [WHMBK-92] etwa 34% aller Kunststoffzahnräder aus POM. POM wird sowohl mit Kohlenstofffasern als auch mit Aramidfasern und zusätzlichen Trockenschmierstoffen untersucht. Von einer reinen Aramidfaserverstärkung wurde aufgrund des sehr hohen Reibungskoeffizienten dieser Kombination [Delr-00] abgesehen.

Polyamide (PA)

Polyamide sind Polymere, deren Moleküle aus Amidgruppen (CO-NH-Gruppe) aufgebaut sind. Diese bestimmen wesentlich das Verhalten der Polyamide. Aus der Vielzahl der entwickelten Polyamide haben von den teilkristallinen bisher PA66, PA6, PA610, PA11 und PA12 große technische Bedeutung erlangt. PA66 zeigte sich von den genannten Polyamiden für Leistungsgetriebe bisher am geeignetsten. Es zeichnet sich durch hohe Härte, Abriebfestigkeit und Formbeständigkeit in der Wärme aus. Zur weiteren Verbesserung der tribologischen und mechanischen Eigenschaften wird PA66 mit Kohlenstofffasern, mit Aramidfasern und mit Aramidfasern mit Trockenschmierstoff untersucht. PA46 weist gegenüber anderen Polyamiden einen höheren Schmelzpunkt und eine bessere Festigkeit und Steifigkeit bei höheren Temperaturen auf. Seine hohe Schmelztemperatur und guten Festigkeitseigenschaften könnten zu guten Tragfähigkeiten führen. Der Werkstoff wurde bisher noch nicht für Zahnräder eingesetzt. Erste Untersuchungen mit PA46 als Zahnradwerkstoff führte HEYM [Heym-97] durch. Er stellte dabei geringere Tragfähigkeiten gegenüber POM fest. Seine Untersuchungen werden in dieser Arbeit fortgeführt. PA46 konnte nur in unmodifizierter Form untersucht werden, da kein PA46 mit Füll- und/oder Verstärkungsstoffen handelsüblich erhältlich ist.

In Tabelle 5 sind die ausgesuchten Werkstoffe und deren Zusammensetzung dargestellt.

Werkstoff	Granulat-bezeichnung (Hersteller)	Halbzeugname (Hersteller)	Grundwerkstoff	Zusätze in Gewichtsprozent
PEEK	PEEK 450 G (Victrex)	gespritzt	PEEK	-
PEEK FC30	PEEK 450 FC30 (Victrex)	gespritzt	PEEK	30% Graphit, PTFE, Kohlenstofffasern
PEEK CA30	PEEK 450 CA30 (Victrex)	gespritzt	PEEK	30% Kohlenstofffasern
POM	Hostaform X354 (Ticona)	Tecaform AH (Ensinger)	POM	-
POM+20%CF	Hostaform X 326 (Ticona)	gespritzt	POM	20% Kohlenstofffasern
POM+10%AF +10%PTFE	KAL - 4022 (LNP)	gespritzt	POM	10% Aramidfasern +10%PTFE
PA66	Ultramid A4H (BASF)	Tecamid 66 (Ensinger)	Polyamid 66	-
PA66+20%AF	Zytel 70K20 (DuPont)	gespritzt	Polyamid 66	20% Aramidfasern
PA66+15%AF+ 10%PTFE	RAL - 4023 (LNP)	gespritzt	Polyamid 66	15% Aramidfaser + 10% PTFE
PA66+20%CF	RC -1004 (LNP)	gespritzt	Polyamid 66	20% Kohlenstofffasern
PA46	Stanyl TW300	gespritzt	Polyamid 46	-

Tab. 5: Übersicht über die Zusammensetzung der verwendeten Kunststoffe

Eine Übersicht der wichtigsten Eigenschaften der verwendeten Kunststoffe ist Tabelle 1A und Tabelle 2A im Anhang A2 zu entnehmen.

3.2 Verzahnungsgeometrie

Die Kennwerte der untersuchten Verzahnungen, welche die geometrischen Merkmale beschreiben, sind aus Tabelle 6 abzulesen (nach [Linke-96]).

Stirnrad, außenverzahnt	Ritzel (Stahlzahnrad)	Rad (Kunststoffzahnrad)
Modul m	2 mm	2 mm
Zähnezahl z	22	31
Bezugsprofil Verzahnung Werkzeug	DIN 867 DIN 3972	
Schrägungswinkel β	0°	
Flankenrichtung	-	
Teilkreisdurchmesser d_t	44 mm	62 mm
Grundkreisdurchmesser d_b	41,3465 mm	58,2609 mm
Kopfkreisdurchmesser d_k	48,0 mm	66,0
Profilverschiebungsfaktor x	0	
Zahnbreite b	13 mm	12 + 0,1 mm
Zahnweite W_k über k Messzähne	15,369 mm k=3	21,281 mm k=4
Achsabstand im Gehäuse a [mm]	53,0 für Kunststoff/Stahl 53,35 für Kunststoff/Stahl bei 120°C Öltemperatur	

Tabelle 6: Verzahnungsgeometrie der Prüfzahnäder

Sollen Kunststoffzahnräder bei hohen Temperaturen eingesetzt werden, so müssen die erhöhten Wärmedehnungen des Kunststoffes beachtet und bei der Fertigung vorgehalten werden. Dafür stehen verschiedene Möglichkeiten zur Verfügung:

- wärmedehnungskorrigierter (Verzahnungs-) Modul,
- Achsabstandsvergrößerung,
- negative Profilverschiebung.

BAUMGART [Baum-92] stellte bei Untersuchungen an Zahnrädern mit wärmedehnungskorrigiertem Modul eine verringerte Lebensdauer gegenüber vergleichbaren DIN - Zahnrädern fest. Darum wird diese Art des Wärmeausgleiches in dieser Arbeit nicht angewendet.

In verschiedenen Anwendungsrichtlinien [Tic-97] [Dupo-97] werden Achsabstandsvergrößerungen empfohlen, die gegenüber einer Profilverschiebung wesentlich wirtschaftlicher einsetzbar sind. So können Zahnräder mit gleicher Geometrie bei verschiedenen thermischen Beanspruchungen angewendet werden. Bei der Verwendung einer Profilverschiebung müsste für jeden Einsatzfall eine andere Profilverschiebung und damit eine andere Spritzgussform eingesetzt werden. Bei der Achsabstandsvergrößerung muss lediglich in der Konstruktion der Achsabstand richtig vorgegeben werden. Diese Variante wird deshalb in der industriellen Praxis bevorzugt. Sie wurde auch für die ölgeschmierten Kunststoffzahnräder bei 120°C Öltemperatur bei den durchgeführten Untersuchungen eingesetzt.

Die für die Prü fzahnräder erforderliche Vergrößerung des Achsabstandes wurde nach [Dupo-97] abgeschätzt und bei Betriebstemperatur über das Zahnflankenspiel mit Schiebelehren nachgemessen.

3.3 Probenherstellung

Das Stahlritzel besteht aus einsatzgehärtetem 16MnCr5. Die Oberflächenrauigkeiten am geschliffenen Stahlritzel betragen $R_a = 3 \mu\text{m}$.

Die Kunststoffzahnräder wurden spritzgegossen und teilweise (aus Kostengründen bei der geringen Stückzahl) gefräst. Für die gefrästen Zahnräder sind zuerst aus Stangenmaterial Rohlinge gedreht worden. Anschließend wurde im Abwälzfräsv erfahren die Verzahnung an den Rohlingen hergestellt.

Um bei den spritzgegossenen Zahnrädern Einflüsse von Bindenähten zu vermeiden, sind sie mit einem Schirmanguss hergestellt worden (Abb. 6).

Nachteil dieser Herstellung ist die erforderliche nachträgliche spannende Bearbeitung. So muss der Schirmanguss abgedreht und die Bohrung auf Maß ausgedreht werden. Abb. 6 zeigt links den Rohling und rechts das fertig bearbeitete Prüfzahnrad.

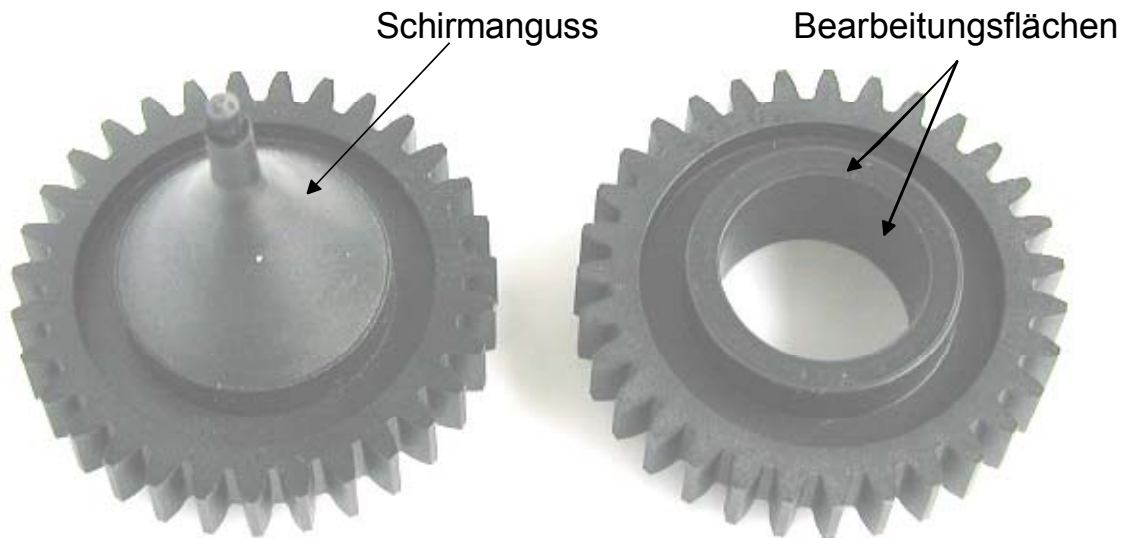


Abb. 6: Spritzgegossener Zahnradrohling (links) und fertiges Prüfzahnrad (rechts)

Die Faserorientierung bei den spritzgegossenen Zahnrädern ist wesentlich beanspruchungsgerechter als die bei den gefrästen Zahnrädern (Abb. 7). Durch die Biegebeanspruchung entstehen im Zahnfuß ein Zug- und ein Druckbereich. Bei einem Zahnfußbruch geht der Bruch von der Zugseite aus. Die maximalen Zugspannungen befinden sich im Randbereich der Flanken. Aus Abb. 7 ist deutlich erkennbar, dass die Fasern der spritzgegossenen Zahnräder gerade im Randbereich des Zahnfußes, wo die Zugbeanspruchung maximal ist, in Zugrichtung liegen. Bei den gefrästen Zahnrädern ist solch eine beanspruchungsgerechte Faserorientierung nicht vorhanden, da sie aus extrudierten Stangen gefräst wurden. Die Fasern liegen deshalb in Achsrichtung und wirken somit nicht festigkeitssteigernd. Die verschiedenen Fertigungsverfahren lassen unterschiedliche Zahnfußfestigkeiten bei sonst gleichem Werkstoff erwarten.

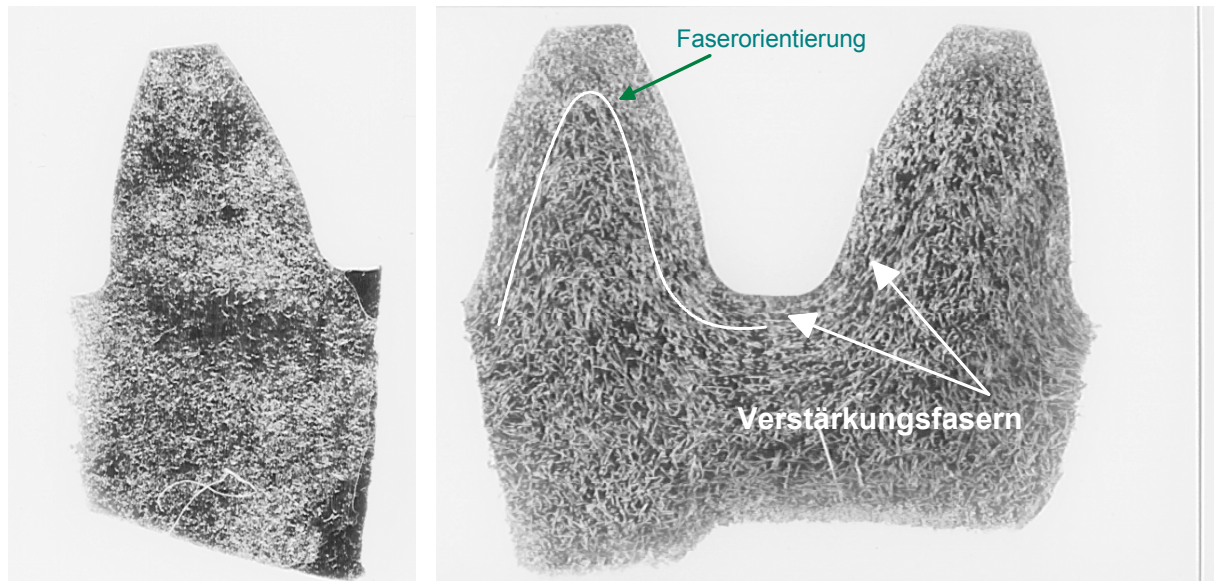


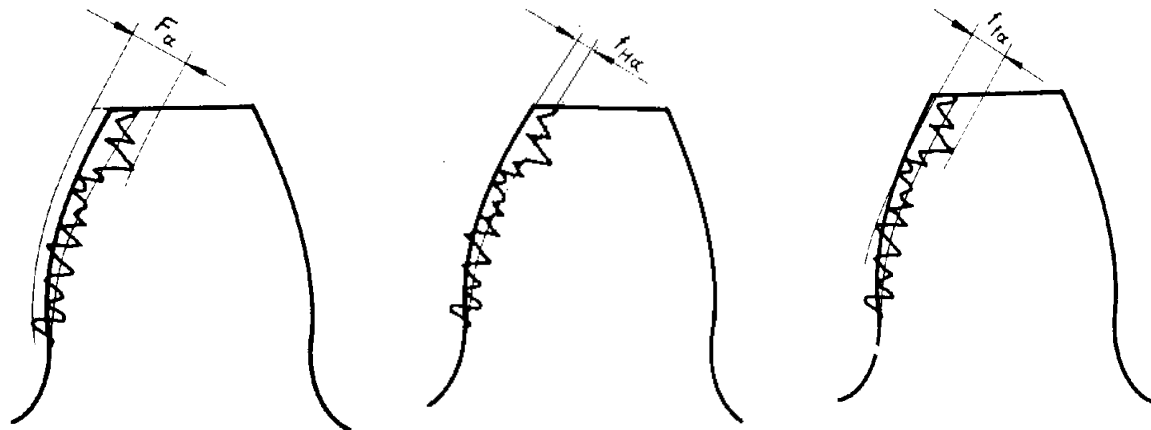
Abb. 7: Faserorientierung bei aus extrudierten Material gefrästen (links) und spritzgegossenen (rechts) Zahnrädern

3.4 Verzahnungsqualitäten

Aus Tabelle 9 ist die Übersicht der Verzahnungsqualitäten zu entnehmen. Die Verzahnungsqualitäten werden mit der Zweiflankenwälzprüfung nach DIN 3963 (Tab. 7) und mit der Flankenformmessung nach DIN 3962 (Tab. 8) bestimmt. Die Prüfverfahren sind in der [VDI-2608] beschrieben.

Die Zweiflanken-Wälzprüfung ist eine Sammelfehlerprüfung, wobei die Messschriebe Rückschlüsse auf bestimmte Einzelfehler geben. Bei der Zweiflanken-Wälzprüfung werden zwei Zahnräder mit ihren Verzahnungen radial ineinander gedrückt und spielfrei miteinander abgewälzt. Als Gesamtwirkung der Einzelabweichungen ändert sich dabei der spielfreie Achsabstand a'' .

Die Vermessung der Flankenform wird in Kap. 4.4 beschrieben. Es ist die selbe Vorgehensweise wie bei der Verschleiß- und Kriechverformungsbestimmung. Dabei wurden folgende Verzahnungsabweichungen ermittelt (Abb. 8).



Profil-Gesamtabweichung F_α

Profil-Winkelabweichung $f_{H\alpha}$

Profil-Formabweichung f_{fa}

Abb. 8: Ansicht der gemessenen Verzahnungsabweichungen bei der Einflankenmessung [Linke-96]

Die erreichten Verzahnungsqualitäten sind gegenüber denen bei Stahlzahnradern aufgrund der unterschiedlichen Fertigungsverfahren erheblich schlechter. Beim Spritzgießen entstehen durch die Schwindung Verzahnungsfehler. Diese können grundsätzlich durch Korrektur der Spritzgussform verringert werden. Dies erfordert aber für jeden Werkstoff eine eigene Form, die jeweils für jeden Werkstoff eigens optimiert werden muss. Aufgrund der enorm hohen Kosten war dies im Rahmen dieser Arbeit nicht möglich. Wie bereits in [Heym-97] festgestellt, sind die Auswirkungen der Verzahnungsqualität auf das Laufverhalten der Kunststoffzahnradrelativ gering, was auch durch die Erfahrungen von Zahnradhersteller bestätigt wird. Eine genaue Aussage über den Zusammenhang von Qualität und Laufleistung ist nicht möglich. Generell wiesen die spritzgegossenen faserverstärkten Zahnradrelativ etwas schlechtere Verzahnungsqualitäten als die spritzgegossenen unverstärkten Zahnradern auf. Dies lag daran, dass die verfügbare Spritzgussform für einen unverstärkten Werkstoff (PEEK) ausgelegt wurde. Der Unterschied der Schwindungen zu den anderen unverstärkten Werkstoffen war wesentlich geringer als der Schwindungsunterschied zu faserverstärkten Kunststoffen. Somit kommt es zu recht unterschiedlichen Verzahnungsabweichungen. Da die Verzahnungsqualitäten von Zahnradern aus dem gleichen Kunststoff teilweise verschiedene Qualitäten aufweisen, werden z.T. mehrere Qualitätsgruppen angegeben. Manchmal gab es auch Ausreißer, die stark von den üblichen Qualitäten abweichen. Diese sind in Tab. 7 und Tab. 8 besonders gekennzeichnet.

Werkstoff	Wälzabweichung F'' [μm]	Qualität	Wälzsprung f'' [μm]	Qualität
PEEK 450G	53 - 106 (einzeln 118)	9 - 11 (einzeln 12)	18 - 42,8	9 - 11 (einzeln 12)
PEEK FC30	210,3 - 237,7	>12	161,6 - 170,9	>12
PEEK CA30	240 - 309,7	>12	187,7 - 204,3	>12
PA66	86-103	11	34-41	11
PA66+20%CF	178-228	12- >12	139-168	>12
PA66+20%AF	90-110	>12	55-75	11
PA66+15%AF+ 10%PTFE	66-114	9-11	34-53	10-11
POM	88-103	11	38-42	11
POM+20%CF	146-210	11 - >12	120-176	>12
POM+10%AF+ 10%PTFE	114-176 (einzelne Zahnräder 218)	11-12 (einzelne Zahnräder >12)	67 - 80 (einzelne Zahnräder 172)	11-12 (einzelne Zahnräder >12)
PA46	90-105	11	35-40	11
PA66+20%AF (gefräst)	85-100	11	32-44	11

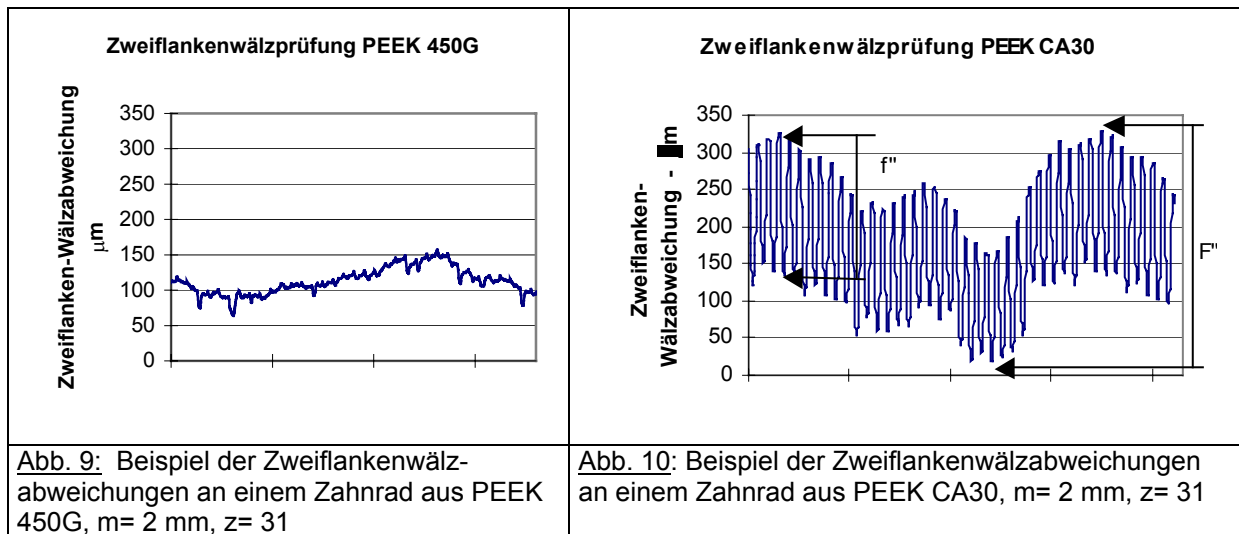
Tab. 7: Zusammenfassung der Zweiflankenmessung (nach DIN 3963) – f'' und F'' siehe Abb.10

Werkstoff	Profilgesamt- abweichung F_α [μm]	Profil-Winkel- abweichung $f_{H\alpha}$ [μm]	Profilform- abweichung $f_{f\alpha}$ [μm]	Qualität
PEEK 450G	27,5 bis 52	25,5 bis 54	8 bis 12	10 bis 11 (einzeln 12)
PEEK FC30	173 bis 208	184 bis 216	15,5 bis 29	> 12
PEEK CA30	176 bis 206	184 bis 216	20 bis 29	> 12
PA66 (gefräst)	50 bis 80	4 bis 8	60 bis 80	11 bis 12
PA66+20%CF	177 bis 195	173 bis 190	2 bis 10	> 12
PA66+20%AF	70 bis 90	75 bis 90	2 bis 5	> 12
PA66+15%AF+ 10%PTFE	53 bis 86	54 bis 88	1 bis 5	11 bis >12
POM (gefräst)	55 bis 85	2 bis 8	25 bis 70	11 bis 12
POM+20%CF	122 bis 155	126 bis 158	2 bis 4	> 12
POM+10%AF+ 10%PTFE	43 bis 62	48 bis 67	8 bis 15	12 bis >12
PA46	20 bis 50	20 bis 30	24 bis 42	11
PA66+20%AF (gefräst)	30 bis 54	22 bis 35	30 bis 45	11

Tab. 8: Übersicht der Einflankenmessung (nach DIN 3962)

Bei allen spritzgegossenen Zahnrädern waren lediglich geringe Profilformabweichungen zu verzeichnen. Die gefrästen Zahnräder wiesen aufgrund der Frässpuren größere Profilformabweichungen auf. Die gefrästen und die unverstärkten gespritzten Zahnräder zeigten nur geringe Profilwinkelfehler. Dieser war bei den verstärkten gespritzten Zahnrädern deutlich größer. Tendenziell kann gesagt werden, dass mit steigendem Faseranteil der Profilwinkelfehler, bei der hier gewählten Spritzgussform, wächst. Wie bereits erwähnt, liegt das daran, dass die Form für einen unverstärkten Kunststoff gefertigt wurde. Die unterschiedlichen Profilwinkelabweichungen sind auch bei der Zweiflankenmessung anhand des

Wälzsprunget f'' deutlich zu sehen. Abb.9 und Abb.10 zeigen die unterschiedlichen Ergebnisse der Zweiflankenmessungen an Zahnrädern aus unverstärktem gespritzten PEEK 450G und aus verstärktem gespritzten PEEK CA30.



Für die Qualitätsbestimmungen sind die schlechtesten Werte der gesamten Qualitätsmessungen ausschlaggebend. Die endgültigen Qualitäten sind in Tabelle 9 zusammengefasst.

Werkstoff-nr.	Werkstoff (Fertigungsart)	Verzahnungsqualität
1	PEEK 450G (spritzgegossen)	10-11
2	PEEK FC30 (spritzgegossen)	>12
3	PEEK CA30 (spritzgegossen)	>12
4	PA66 (gefräst)	11 - 12
5	PA66+20%CF (spritzgegossen)	>12
6	PA66+20%AF (spritzgegossen)	>12
7	PA66+15%AF+10%PTFE (spritzgegossen)	11- >12
8	POM (gefräst)	11 -12
9	POM+20%CF (spritzgegossen)	>12
10	POM+10%AF+10%PTFE (spritzgegossen)	11-12
11	PA46 (spritzgegossen)	11
12	PA66+20%AF (gefräst)	11

Tab. 9: Übersicht der Verzahnungsqualitäten nach DIN 3962 und DIN 3963

Es ist deutlich erkennbar, dass faserverstärkte spritzgegossene Kunststoffzahnräder die schlechtesten Qualitäten aufwiesen, da die Spritzgussform lediglich für unverstärktes PEEK optimiert wurde. Weil die Schwindungsunterschiede zwischen den unverstärkten Kunststoffen untereinander geringer sind als der Schwindungsunterschied von einem unverstärkten zu einem faserverstärkten Kunststoff, waren die Verzahnungsqualitäten der unverstärkten Zahnräder besser als die verstärkter Zahnräder. Die Verzahnungsqualitäten der gefrästen Zahnräder waren ähnlich denen unverstärkter gespritzter Zahnräder.

3.5 Prüfgetriebe und Betriebsparameter

Zahnradpaarung und Treibrichtung

Untersucht wurde die Paarung Stahlritzel/Kunststoffrad. Die Treibrichtung ist „Ritzel treibt Kunststoffrad“.

Drehzahl und Tangentialgeschwindigkeit

Die Drehzahlen am großen Rad betrugen 2310 min^{-1} und am Ritzel 3255 min^{-1} . Damit ergab sich eine Tangentialgeschwindigkeit am Teilkreisdurchmesser von $v_t = 7,5 \text{ m/s}$. Diese Teilkreisgeschwindigkeit wurde wegen einer besseren Vergleichbarkeit mit den Versuchsergebnissen von HEYM [Heym-97], der dieselben Prüfmaschinen benutzte, ausgewählt.

Schmierungsart

Die Prüfgetriebe wurden im trockenlaufenden und ölgeschmierten Zustand getestet. Die Zahnräder wurden vor den Versuchen mit Isopropanol entfettet und gereinigt. Die Getriebeuntersuchungen an ölgeschmierten Zahnradern (Tauchschmierung) wurden bei 120°C Öltemperatur durchgeführt (Ölsorte 10W40). Als Eintauchtiefe wurde nach [RoMa-94] $e = 2 \cdot \text{Modul}$ gewählt. Das Öl befand sich in einem geschlossenen Behälter, ohne externe Ölpumpe (Abb. 11). Die Verschleißpartikel setzen sich am Boden ab. Der Behälter ist ausreichend tief, so dass die Verschleißpartikel nicht mehr durch die Ölbewegungen ins Getriebe gelangen konnten. Das Öl wurde durch einen Einschraubheizkörper auf $120^\circ\text{C} (\pm 2\text{K})$ erhitzt. Die Temperatur wurde mit einem PC geregelt. Die Öltemperatur wurde über einen PT100 Messwiderstand, der gleichzeitig als Geber für die Temperaturregelung arbeitete, in Teilkreishöhe kontrolliert.

Als Schmiermittel wählte der Auftraggeber Motorenöl des Typs 10W40. Im Versuch kam 10W40 Castrol GTX5 Leichtlauföl mit HC Synthese zum Einsatz.

Um eine gleichmäßige Erwärmung der Kunststoffzahnäder zu gewährleisten, wurde das Getriebe unbelastet in der Aufwärmphase (zirka 1h) bei 200/min betrieben. Nachdem das Öl und die Zahnäder eine konstante Temperatur erreichten, wurde innerhalb weniger Minuten das Prüfmoment über die Verspannung eingebracht. Damit war gewährleistet, dass sich in der Aufwärmphase einzelne Zähne nicht stärker verformen als andere Zähne.

Das Öl wurde nach jedem Versuch vor einer weiteren Verwendung gefiltert.

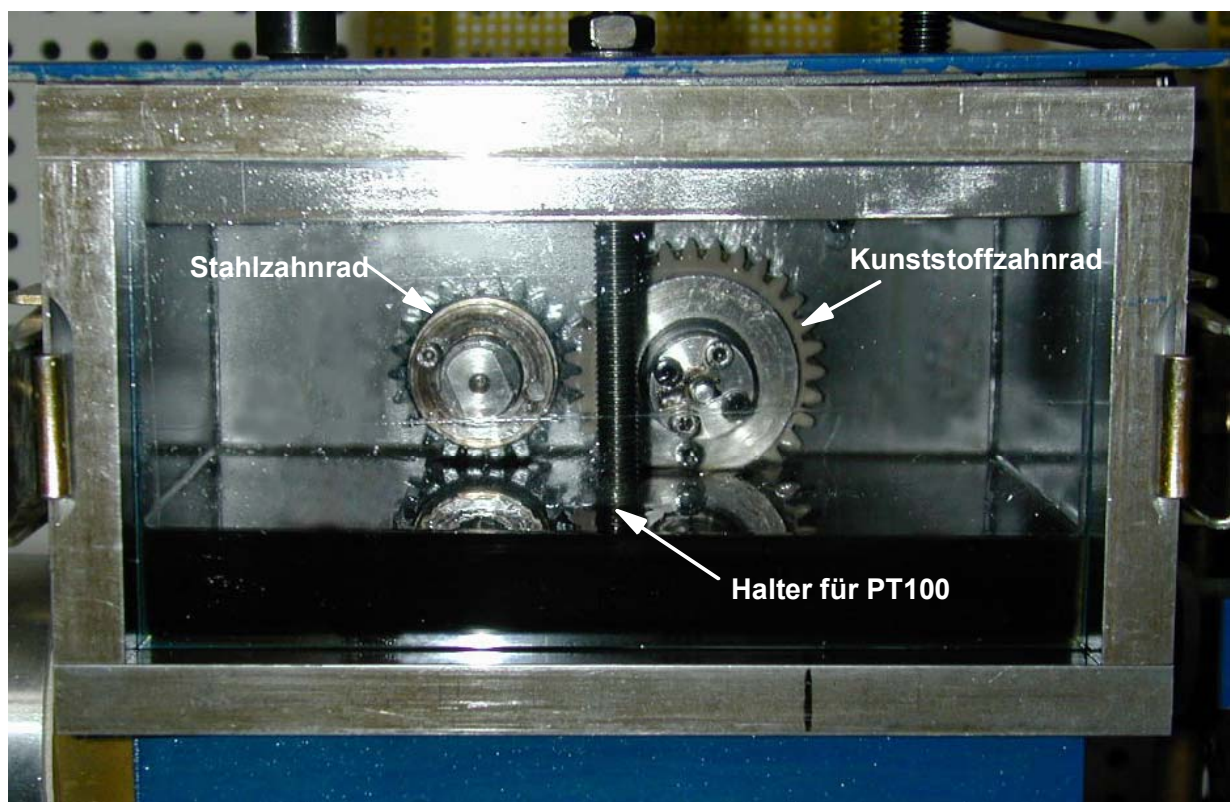


Abb. 11: Ölgeschmierte Prüzzahnäder im Stand

Lastspiel

Als Lastspiel wurde eine Umdrehung des Kunststoffzahnades definiert. Jeder Zahn am Rad hat ein Lastspiel pro Umdrehung.

Linienlast

Die beaufschlagte Linienlast F_t/b (Tangentialkraft/ Zahnbreite) lag im trockenlaufenden Zustand zwischen 10 und 40 N/mm. Der am intensivsten getestete Bereich lag bei $F_t/b = 20 - 25$ N/mm.

Bei Ölschmierung wurde im Bereich von $F_t/b = 25$ N/mm bis 65 N/mm getestet.

Belastungsmoment

Das im Stillstand aufgebrachte Drehmoment ergibt sich aus der statischen Verspannung der Drehfedern. Es errechnet sich aus der beaufschlagten Linienlast, der Zahnbreite und dem Zahnrad Durchmesser. Das Prüfdrehmoment (am Rad) lag zwischen 3,7 Nm und 14,9 Nm. Das durchschnittliche Prüfmoment lag bei 7,44 Nm - 9,3 Nm.

Bei Ölschmierung wurde der Bereich 9,3 Nm bis 24,18 Nm getestet.

Prüfleistung

Die umlaufende Prüfleistung der Kunststoffgetriebe ergibt sich aus der geregelten Drehzahl und dem statischen Verspannmoment. Sie lag zwischen 1,35 bis 3,6 kW, wobei die durchschnittliche Prüfleistung bei 1,8 kW - 2,25 kW lag. Bei Ölschmierung wurde der Bereich 2,2 kW bis 5,8 kW getestet. Aufgrund des verwendeten Verspannprinzips musste lediglich die Verlustleistung von Prüfmaschine und Prüfgetriebe zugeführt werden.

Temperaturen

Die trockenlaufenden Kunststoffzahnäder liefen unter normalen Umgebungstemperaturen (20-23°C) ohne externe Belüftung. Durch die Schutzgitter an den Prüfgetrieben wurde ein Luftaustausch eher noch behindert, so dass die bereits vom Getriebe erwärmte Luft zum Getriebe zurückgelangte. Somit können die thermischen Belastungen an einem freilaufenden Prüfgetriebe als eher geringer eingeschätzt werden.

Die Prüfmaschinen sind mit einer Ölumlaufschmierung versehen. Je nach Belastung und Kunststoff stieg die Maschinentemperatur auf einen konstanten Wert (50-75°C). Auch die Ölumlaufemperatur erreichte einen konstanten Wert, der zwischen 30 - 40°C lag. Bei den Versuchen mit Ölschmierung erreichten die Maschinen Temperaturen von 76°C bis 82°C und das Umlauföl von 56°C bis 65°C.

3.6 Versuchsplan

Da bei den ölgeschmierten Zahnrädern aus PEEK im Bereich hoher Temperaturen zunächst nur Erkenntnisse über eine generelle Eignung der Hochtemperaturthermoplaste gewonnen werden sollten, waren nur Tragfähigkeitsuntersuchungen vorgesehen. Aufbauend auf diesen Ergebnissen soll in einem Folgeprojekt für die erfolgversprechendsten Kunststoffe intensivere Untersuchungen durchgeführt werden. Diese werden im Ausblick näher definiert.

Bei den trockenlaufenden Zahnrädern waren umfangreichere Untersuchungen durchgeführt (Tab. 10). Hierbei handelte es sich um Tragfähigkeits-, Wirkungsgrad-, Zahnmasse-temperatur-, Verschleiß-, und Kriechverformungsuntersuchungen. Geräuschuntersuchungen waren nur als ergänzende Forschung vorgesehen und wurden deshalb nur an einigen wenigen Kunststoffen durchgeführt. Die Parameter, die bereits von HEYM [Heym-97] analysiert wurden, waren hier nicht noch einmal zu erforschen. Sie wurden zum Vergleich mit herangezogen.

	PEEK FC30	PA66	PA66 +20%CF	PA66 +20%AF	PA66 +15%AF +10%PTFE	POM	POM +20%CF	POM +10%AF +10%PTFE	PA46
Tragfähig- keit		[Heym-97]				[Heym-97]			
Wirkungs- grad									[Heym-97]
Zahnmasse- temperatur		[Heym-97]				[Heym-97]			[Heym-97]
Geräusch									
Verschleiß									[Heym-97]
Kriechver- formung									[Heym-97]

Tab. 10: Übersicht der Versuche an den trockenlaufenden Kunststoffzahnradern (grau hinterlegt)

4 Versuchseinrichtungen und Messmethoden

In diesem Kapitel werden die verwendeten Versuchseinrichtungen und die zugehörigen Messmethoden beschrieben, wodurch die einzelnen Versuchsergebnisse besser nachvollzogen und die Übertragbarkeit auf andere Untersuchungen eingeschätzt werden können.

4.1 Getriebeversuche

Die artgleichen Zahnradprüfmaschinen ZPM8 und ZPM8.1 (Abb. 12 und Abb. 13) wurden für Versuche zur Ermittlung der Lebensdauer und des Verschleißes an Kunststoffzahnradern von BAUMGART [Baum-92] und HEYM [Heym-97] konstruiert. Im Rahmen dieser Forschungsarbeit wurden die Maschinen umgebaut, um das maximal prüfbare Moment von 9,5 Nm auf 24 Nm zu erhöhen. Die maximale Prüfleistung konnte von 3 kW auf 7,5 kW erhöht werden. Beide Prüfmaschinen arbeiten nach dem Verspannprinzip, d.h. es wird ein statisches Moment über Verspannfedern in den Verspannkreis eingebracht. Sie sind wie die FZG-Zahnrad-Verspannungs-Prüfmaschine nach DIN 51354 aufgebaut. Durch die weiche geschichtete Drehfeder wird der verschleißbedingte Momentenabfall sehr gering gehalten. Der so verspannte Kreis wird dann über einen E-Motor angetrieben.

Die Prüfleistung einer Zahnradpaarung ergibt sich aus:

$$\text{Prüfleistung} = \text{Winkelgeschwindigkeit} \cdot \text{Verspannmoment}$$

Der Motor muss lediglich die Verlustleistung der Prüfmaschine (inklusive Verspann- und Kunststoffzahnradgetriebe) aufbringen.

Mit Hilfe von PT 100 - Messwiderständen und den dazugehörigen Messkarten können an ZPM8 und ZPM8.1 die Zahnmasse Temperaturen (siehe Kap. 4.3) ermittelt werden.

Die Zahnradprüfmaschinen ZPM8 und ZPM8.1 verfügen über folgende Abschaltkriterien:

- Zahnbruch, der mit einer Lichtschranke detektiert wird (nicht bei Öllauf),
- Überschreiten einer maximalen Ölbadtemperatur (nur bei Öllauf aus Sicherheitsgründen),
- Zahnbruch über Abfall des Verspannmomentes,

- Grenzwert des Verspannmomentes über eine einstellbare obere Drehmomentengrenze (wird bei Blockieren des Prüfgetriebes benötigt),
- Erreichen einer bestimmten einstellbaren Lastspielzahl und
- Ausfall des Zählers für die Lastspiele.

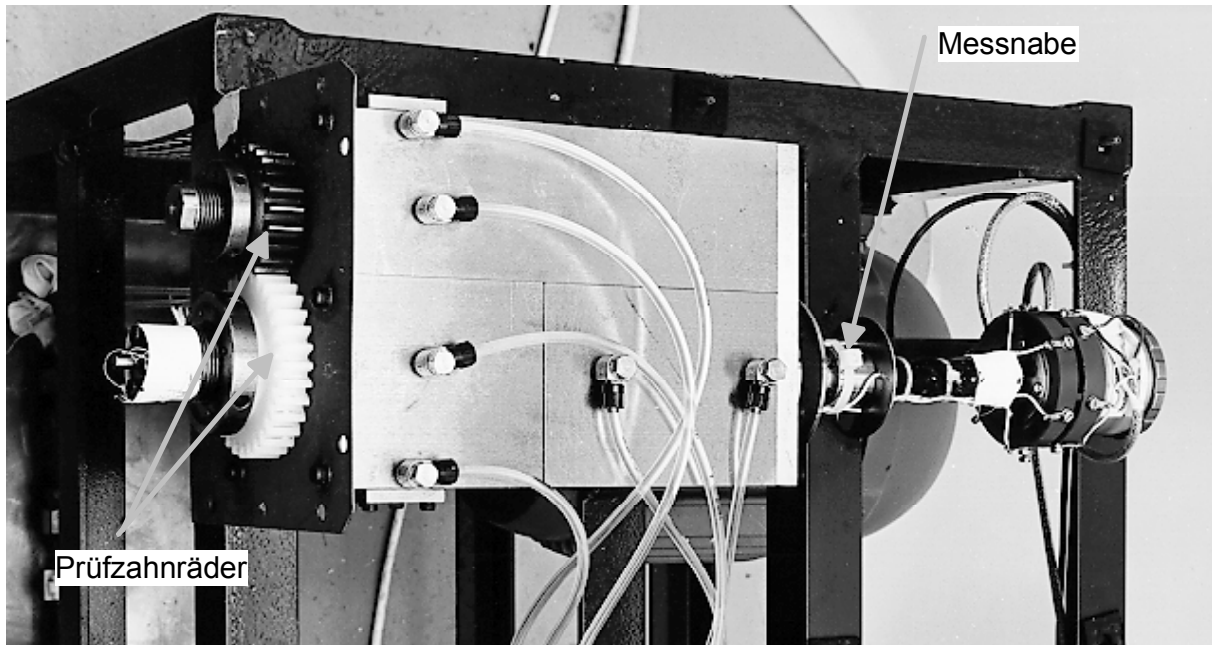


Abb. 12: Foto von ZPM8

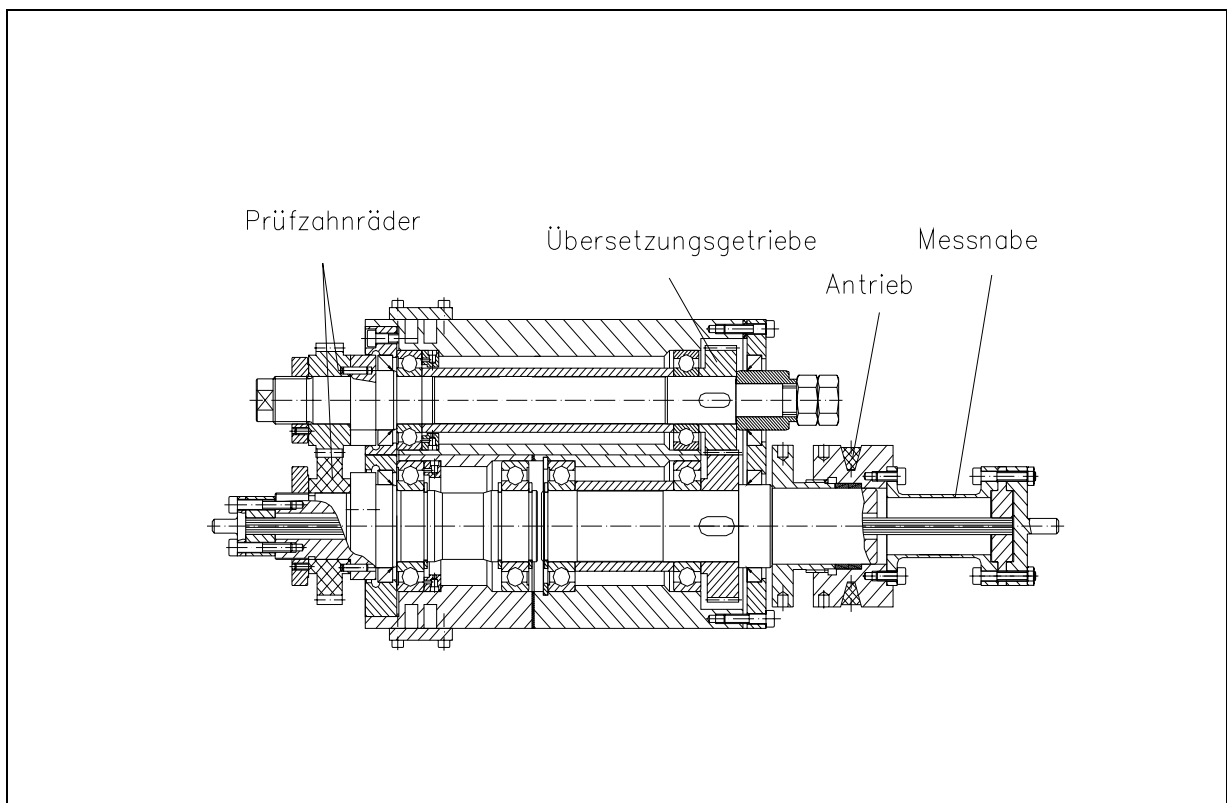


Abb. 13: Schnittdarstellung von ZPM8

4.2 Wirkungsgradermittlung

Die Verlustleistung eines normalen Getriebes ergibt sich aus der Differenz von Eingangs- und Ausgangsleistung.

Je höher die Verluste des Kunststoffgetriebes sind, desto höher sind die im Zahn auftretenden Temperaturen. Dies führt zu einem Abfall der mechanischen Festigkeiten (beispielsweise Zug- und Biegefestigkeit) und zu einem erhöhten Ausfallrisiko durch Anschmelzungen. Somit ist der Wirkungsgrad eine wichtige Kenngröße für ein Kunststoffgetriebe.

Zur Bestimmung des Wirkungsgrades wurde in diesem Vorhaben die Zahnradprüfmaschine ZPM10 (Abb. 14 und Abb. 15) konstruiert. Sie arbeitet wie ZPM8 und ZPM8.1 ebenfalls nach dem Verspannprinzip.

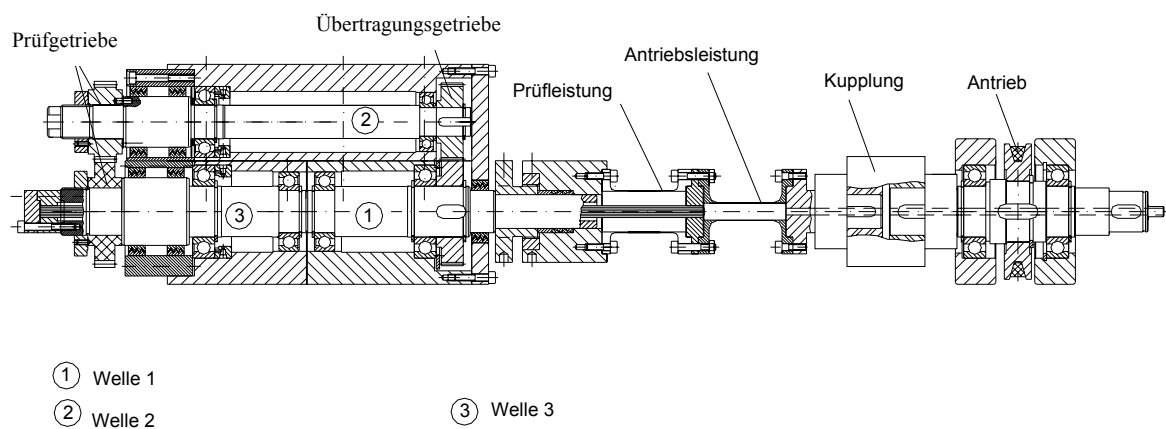


Abb. 14: Schnittdarstellung von ZPM10

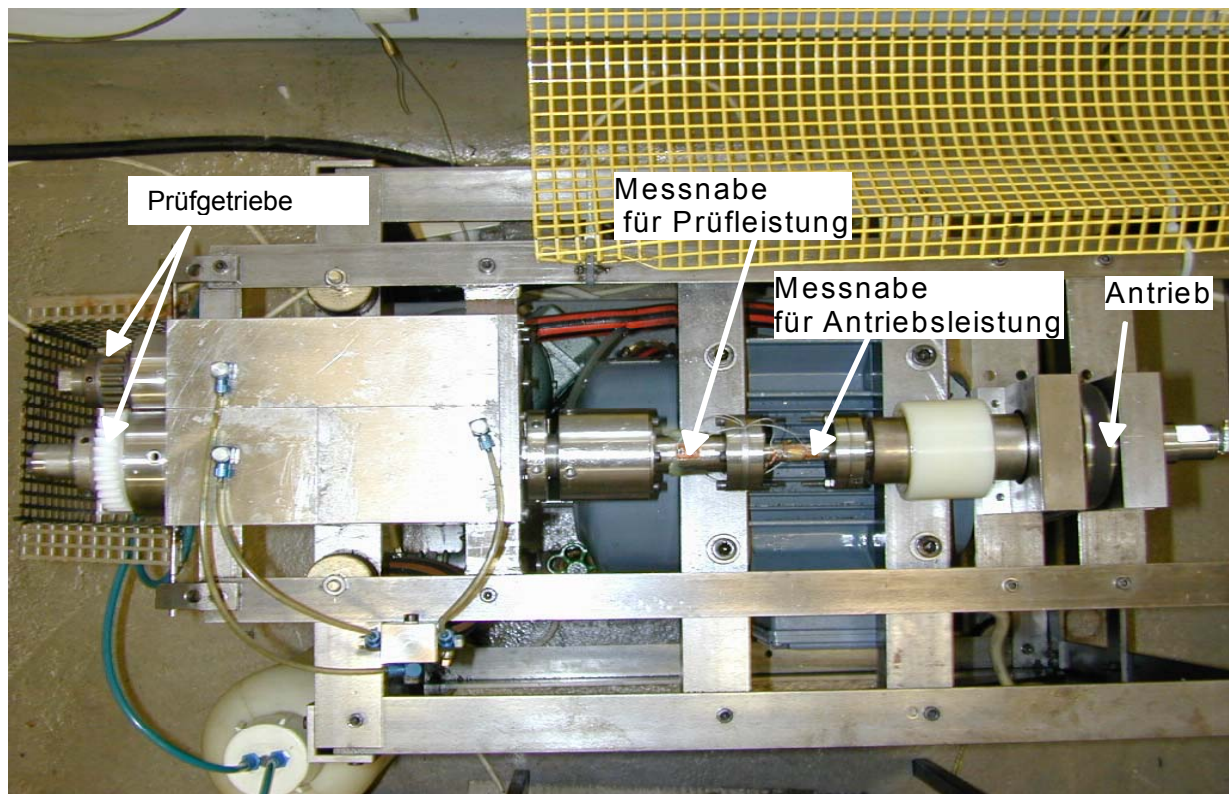


Abb. 15: Foto von ZPM10

Wie bereits in Kap. 4.1 erwähnt, muss bei diesem Verspannprinzip lediglich die Verlustleistung von Prüfmaschine und Prüfgetriebe aufgebracht werden. Diese Leistung entspricht der erforderlichen (und gemessenen) Antriebsleistung. Die Verlustleistung der Prüfmaschine ZPM10 ($P_{\text{Maschinenverluste}}$) setzt sich aus den Verlusten des Übertragungsgetriebes und den Lagerverlusten zusammen.

Die Verlustleistung des Prüfgetriebes ($P_{\text{Prüfgetriebeverluste}}$) errechnet sich aus der eingespeisten Antriebsleistung (P_{Antrieb}) abzüglich der Prüfmaschinenverlustleistung.

$$P_{\text{Prüfgetriebeverluste}} = P_{\text{Antrieb}} - P_{\text{Maschinenverluste}} \quad (4 - 1)$$

Bei ZPM 10 wird die Prüfleistung ($P_{\text{Prüf}}$) und die Verlustleistung (Antriebsleistung) der Prüfmaschine mittels Drehmomentmessnaben bei festgelegter Drehzahl gemessen.

Der Wirkungsgrad des Prüfgetriebes ($\eta_{\text{Prüfgetriebe}}$) ergibt sich aus der Verlustleistung des Prüfgetriebes ($P_{\text{Prüfgetriebeverluste}}$) und der in das Prüfgetriebe geleiteten Leistung ($P_{\text{Prüfgetriebe}}$):

$$\eta_{\text{Prüfgetriebe}} = 1 - \frac{P_{\text{Prüfgetriebeverluste}}}{P_{\text{Prüfgetriebe}}} \quad (4 - 2)$$

Für die Bestimmung der Prüfgetriebeverluste muss der Leistungsfluss innerhalb der Prüfmaschine betrachtet werden (Abb. 16). Die in das Prüfgetriebe geleitete Leistung ($P_{\text{Prüfgetriebe}}$) ergibt sich aus der gemessenen Prüfleistung ($P_{\text{Prüf}}$) abzüglich

der Lagerverluste von Welle 1 und 2 und der Verluste des Übertragungsgetriebes ($P_{\text{Maschinenverluste I}}$).

$$P_{\text{Prüfgetriebe}} = P_{\text{Prüf}} - P_{\text{Maschinenverluste I}} \quad (4 - 3)$$

Dies gilt bei der hier angewendeten Treibrichtung Ritzel treibt Rad.

Durch die Verlustleistung des Prüfgetriebes verringert sich die umlaufende Leistung weiter und wird nun in die Welle 3 geleitet. Dort entstehen nochmals Lagerreibungsverluste ($P_{\text{Maschinenverluste II}}$), welche die durchlaufende Leistung verringern.

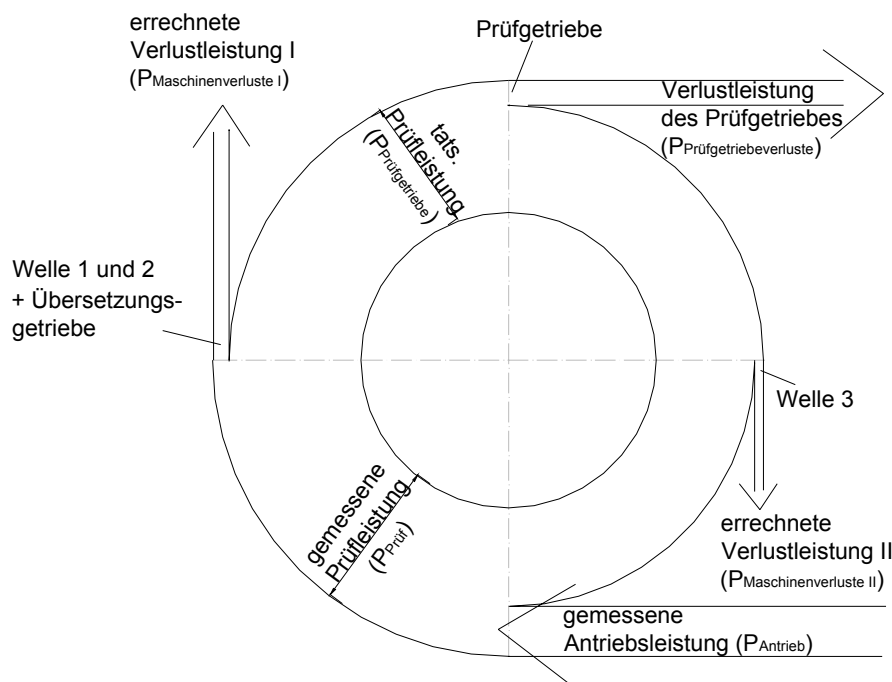


Abb. 16: Leistungsfluss in der Prüfmaschine ZPM10

Werden die Gleichungen 4 – 3 und 4 – 1 in Gleichung 4 – 2 eingesetzt, ergibt sich folgende Wirkungsgradgleichung für das Prüfgetriebe:

$$\eta_{\text{Prüfgetriebe}} = 1 - \frac{P_{\text{Antrieb}} - P_{\text{Maschinenverluste}}}{P_{\text{Prüf}} - P_{\text{Maschinenverluste I}}} \quad (4 - 4)$$

- P_{Antrieb} , gemessene Antriebsleistung, entspricht der Verlustleistung der Prüfmaschine + Prüfgetriebe
- $P_{\text{Maschinenverluste}}$, errechnete Verlustleistung aller Lager und des Übersetzungsgetriebes ($= P_{\text{Maschinenverluste I}} + P_{\text{Maschinenverluste II}}$)
- $P_{\text{Maschinenverluste I}}$, errechnete Verlustleistung der Lager von Welle 1 und 2 und des Übersetzungsgetriebes

- $P_{\text{Maschinenverluste II}}$, errechnete Verlustleistung der Lager von der Welle 3
- $P_{\text{Prüf}}$, gemessene Prüfleistung = tatsächliche Prüfleistung am Prüfgetriebe + $P_{\text{Maschinenverluste I}}$

Die Lagerverluste wurden nach SKF [SKF-89] bestimmt. Die Verluste des Übersetzungsgetriebes wurden nach NIEMANN und OHLENDORF [NiOh-60] ermittelt. Dies beinhaltet die Berechnung der Zahnreibungs- und Leerlaufverluste für die verwendete Stirnzahnradpaarung. Die Berechnung ist ebenfalls in [NiWi-83] erläutert.

Durch den Einsatz von berührungslosen Labyrinthdichtungen treten an den Dichtungen keine Verluste auf. Somit entfällt eine Betrachtung der Dichtungsverluste. Zur Kontrolle der Prüfmaschine ZPM10 wurden mehrere Vergleichsmessungen mit 10 verschiedenen Literaturkennwerten durchgeführt. Dabei zeigte sich eine relativ gute Übereinstimmung der gemessenen Wirkungsgrade mit den Literaturwerten (Abb. 17). Die oberen Balken geben den Minimal- und Maximalwert des jeweiligen Wirkungsgrades an. Bei Werten ohne oberen Balken handelt es sich um den Mittelwert.

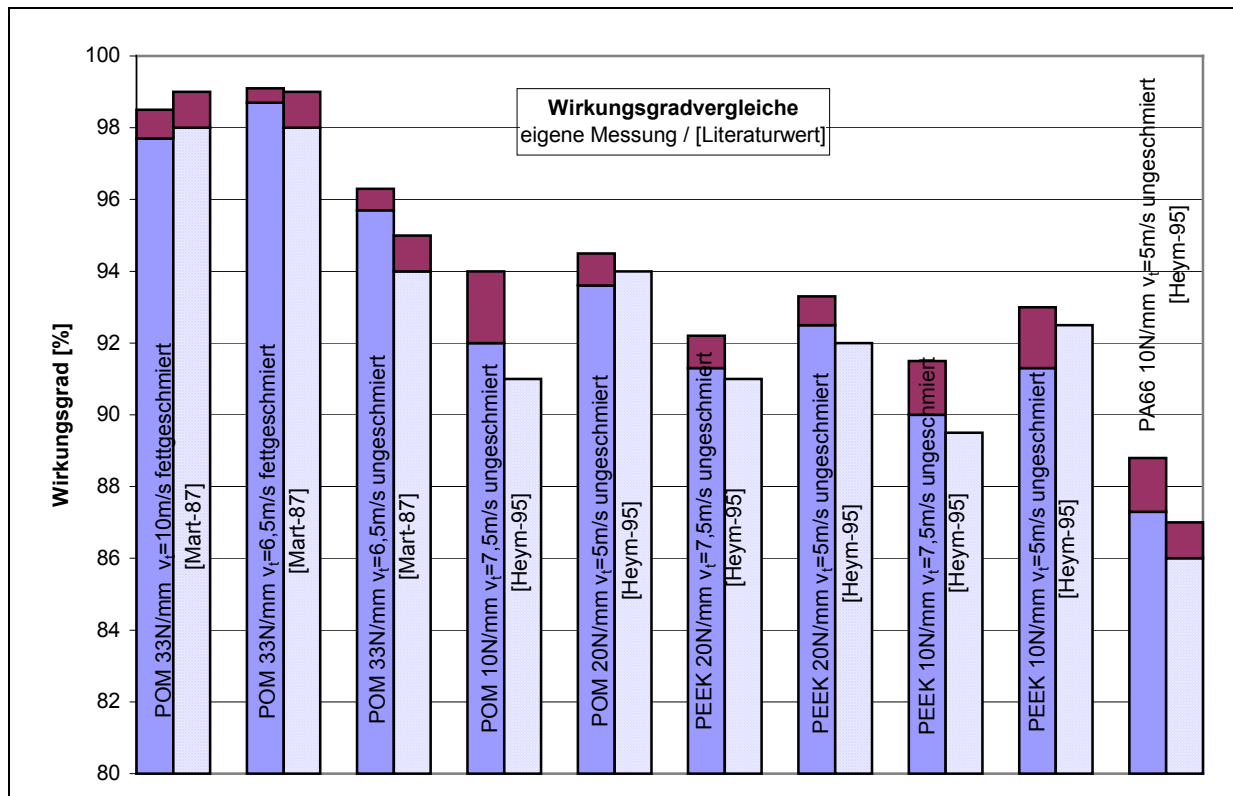


Abb. 17: Vergleich der gemessenen Wirkungsgrade (links) mit [Literaturwerten] (rechts)

4.3 Messen der Zahnmasse­temperatur

Als Temperatur des Kunststoffzahns, in der Literatur auch Zahnmasse- oder Zahnmittentemperatur genannt, wird im Folgenden die mittlere Temperatur des Zahnes verstanden. Sie erreicht nach einer gewissen Einlaufzeit einen nahezu konstanten Wert.

Die Messung der Zahnmasse­temperatur erfolgt mittels PT100 Messwiderständen (Durchmesser 1,3 mm), die in einer Bohrung kurz unterm Teilkreis in Zahnmitte fixiert werden (Abb. 18). Eine Messung genau am Teilkreis ist nicht möglich, da dort die Wanddicken zu gering werden.

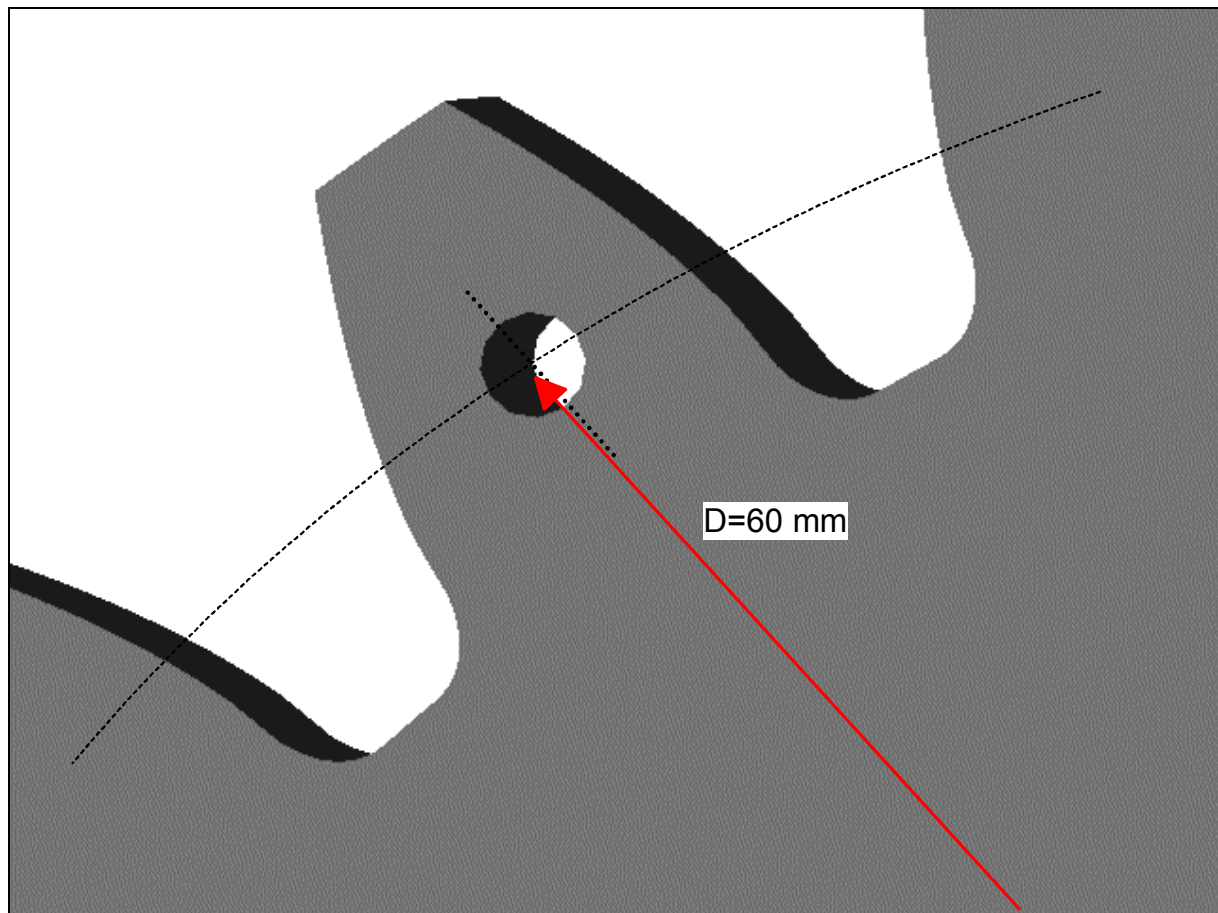


Abb. 18: Messstelle für die Zahnmasse­temperaturmessungen

Der Messwiderstand und die nicht isolierten Kabel werden zum mechanischen und elektrischen Schutz mit Abdeckmittel SG 250 (HBM) isoliert. Dieses Abdeckmittel hat ähnliche Wärmeleiteigenschaften wie Zahnradkunststoffe. Die Kalibrierung der Messkarte erfolgt mit Festwiderständen.

Alle Versuche finden bei gleichen Tangentialgeschwindigkeiten ($v_t = 7,5 \text{ m/s}$) statt. Die Messung erfolgt nach dem Erreichen des Beharrungszustandes ($\approx 1,5 \cdot 10^5$ Lastspiele). Bei geringen Lasten wird aufgrund der geringeren Wärmeeinbringung der Beharrungszustand später erreicht. Gemessen wird deshalb nach $4 \cdot 10^5$ Lastspielen.

Die Zahnmasse­temperatur gibt Anhaltswerte über die Verluste einer Zahnradpaarung. Berechnungsformeln zur Ermittlung der mittleren Zahnmasse­temperatur sind in [HaSt-66], [VDI-2545] und [TaSh-80] dokumentiert.

Die mittlere Zahnmasse­temperatur erreicht bei stationären Bedingungen, nach der Erwärmungsphase, einen konstanten Wert. Die Zahnflankentemperatur wird dagegen nur kurzzeitig bei jedem Eingriff örtlich erhöht und verringert sich danach wieder bis zum nächsten Eingriff. Die Zahnflankentemperatur ist die Temperatur, welche direkt auf der Oberfläche der Zahnflanke herrscht.

Angaben über die Verteilung der Temperatur in den Zähnen einschließlich der Messmethoden wurden von KOGLER [Kog-79] für den Bereich der Feinwerktechnik dargestellt. Die Temperaturverteilung bei höher belasteten Kunststoffgetrieben wird in [TaSh-80] und [TeT3-86] erläutert. ERHARD und WEISS [ErWe-87] zeigten anhand von Messungen mit einer Thermovisionskamera, dass das Stahlzahnrad in der Zahnmitte eine höhere Temperatur als das Kunststoffrad besitzt. Im Stahlzahnrad herrscht aufgrund der hohen Temperaturleitfähigkeit kein erkennbarer Temperaturgradient, während im Kunststoffzahnrad die Temperatur von außen nach innen wegen der geringen Wärmeleitfähigkeit abnimmt. Auch BAUMGART [Baum-92] und HEYM [Heym-97] ermittelten bei der Paarung Kunststoff/ Stahl eine höhere mittlere Temperatur im Stahlzahn als im Kunststoffzahn. Eine mögliche Erklärung dafür wäre, dass bei dem Kunststoffrad aufgrund der schlechten Wärmeleitfähigkeit der überwiegende Teil der entstandenen Wärme durch Konvektion von den Zahnflanken an die Umgebungsluft abgegeben wird. Beim Stahlzahnrad wird dagegen ein größerer Teil durch die bessere Wärmeleitung des Stahls zu den Wellen weitergeleitet.

4.4 Verschleiß- und Kriechverformungsmessung

Das Profil der einzelnen Kunststoffzähne wird durch den abrasiven Verschleiß, Ausbrüche von Material und bleibende Verformungen verändert.

Der Verschleiß wird durch Vermessung der Flanken vor und nach den Lebensdauerversuchen ermittelt. Genauso wird zur Ermittlung der Kriechverformung durch Vermessen der Rückflanken verfahren.

Die Dokumentation der Veränderungen erfolgt durch Vermessung und digitale Speicherung des Flankenprofils mit einer Evolventenprüfmaschine (PFS 600, Fa. Klingenberg). Die Prüfmaschine arbeitet nach dem Wälzprinzip und zeichnet die Abweichungen von der Evolvente mit einem Taster im Profilschnitt auf [Heym-97].

Zur Erfassung des Wälzwinkels wird ein inkrementeller Winkelgeber (Fa. Haidenhain, $0,0036^\circ$ pro Schritt) mit digitaler Schnittstelle verwendet. Die Abweichung wird mit einem induktiven Tastsystem (Messbereich $\pm 0,5$ mm) gemessen und das analoge Ausgangssignal (± 10 Volt) anschließend mit einer Auflösung von 12 Bit digitalisiert. Die Messdatenerfassung wird mit Messkarten in einem PC durchgeführt. Die Steuerung übernimmt ein Programm, welches die Zahnflanke mit 128 äquidistanten Messwertpaaren von Wälzwinkel und Tasterauslenkung aufzeichnet. Die Messwerte werden schließlich mit einer Tabellenkalkulation ausgewertet [Heym-97].

4.5 Geräuschemessung

Für Relativmessungen der Änderung von Zahnradgetriebegeräuschen im Betrieb mit unterschiedlichen Lasten, Drehzahlen und Paarungen wird bei den Versuchen ein Impuls-Schallpegelmessgerät (Impulse Precision Sound Level Meter 2204 von BRÜL & KJÆR) verwendet.

Das Kondensator-Mikrophon mit Schwanenhals wird in konstantem Abstand zum Zahnrad (470 mm) in Höhe der Zahnradwelle aufgestellt. Die Einstellungen entsprechen den von SIEDKE [Sied-77] gewählten Parametern.

Bei der Bewertung eines Gesamtschallpegels sind nur vergleichende Aussagen bezüglich der Zahnradpaarungen möglich. Ein Rückschluss von diesem Vergleich auf Einflüsse wie E-Modul, Verzahnungsqualität und Reibung ist aber nicht möglich, da die einzelnen Anteile durch die Messmethode verfälscht werden. In normalen Räumen ist eine Bestimmung des absoluten Schallpegels nicht möglich, da durch die räumlichen Gegebenheiten die Absolutbeträge stark beeinflusst werden. Der gemessene Pegel wäre unter solchen Bedingungen die Summe von Grundgeräusch und resultierenden Geräuschen mit denselben Frequenzen. Als Grundgeräusch sei hier die Anregung durch Zahneingriff, Eingriffsstoß, Steifigkeitswechsel, Gehäuseabstrahlung, Abstrahlgrad und Sekundärstrahlung (Fundament) betrachtet. Das resultierende Geräusch entsteht aus den Reaktionen mit dem umgebenden Raum (Reflexion, Resonanz und Nahfeld). Während das Grundgeräusch konstant bleibt, ändern sich mit dem Raum die resultierenden Geräusche und somit die Summe.

In jedem unveränderten Raum bleiben bei konstanten Erregerfrequenzen die Störanteile (resultierende Geräusche) proportional gleich. Somit ist eine relative Geräuschemessung möglich.

5 Versuchsergebnisse

Als Untersuchungsschwerpunkt wurden zuerst die Zeitfestigkeiten (Tragfähigkeiten) der Kunststoffzahnräder für die verschiedenen Kunststoffe betrachtet. Dazu erfolgte in Kap. 5.1.1 die Analyse der ermittelten Zahnradschäden, um anschließend in Kap. 5.1.2 die gewählte Auswertungsmethode der Zeitfestigkeiten vorzustellen. In Kapitel 5.1.3 wurden Versuche von Kunststoffzahnradern bei 120° Öltemperatur mit Ölschmierung beschrieben und in 5.1.4 kommentiert. Da die bisherigen Standardkunststoffe (z.B. POM) bei diesen Temperaturen vorzeitig versagen, wurden bei den Versuchen Hochtemperaturthermoplaste (PEEK) verwendet.

Im Kapitel 5.1.5 wurde der Einfluss von Verstärkungsfasern und Füllstoffen bei trockenlaufenden Kunststoffzahnradern erforscht.

In den Kapiteln 5.2 bis 5.5 wurden für trockenlaufende Zahnradpaarungen Wirkungsgrade, Zahnmasse Temperaturen, Verschleiß- und Kriechverformungskennwerte dargestellt. Für einen tendenziellen Einblick in das Geräuschverhalten von Kunststoffzahnradern wurden einige Geräuschmessungen vorgestellt.

5.1 Tragfähigkeit

5.1.1 Schadensarten

Wie bereits in Kap. 2.1 erläutert, sind die Versagensmechanismen stark von den Einsatzbedingungen abhängig. So zeigten sich im **trockenlaufenden Betrieb** oberhalb einer bestimmten werkstoffabhängigen Last Anschmelzungen. Diese führten innerhalb kurzer Zeit zur völligen Zerstörung der Verzahnung. Weiterhin wurden Zahnbrüche und Verschleiß beobachtet. Die Zahnbrüche können sowohl von der aktiven Flanke als auch von außerhalb der aktiven Flanke ausgehen. Verschleiß führt zu einer Veränderung der Zahnoberfläche und gleichzeitig zur Reduzierung des Zahnquerschnittes. Bei normalem Verschleiß ist ein weiterer Betrieb bis zum Bruch möglich. Da von vorneherein für diese Untersuchungen nur Kunststoffe mit guten Verschleißseigenschaften ausgewählt werden (Kap. 2), trat bei keinem Kunststoff extremer Verschleiß auf.

Im **geschmierten Betrieb** wurden Zahnbrüche und Grübchenbildung nachgewiesen. Oft kam es aufgrund der Grübchenbildung bei weiterem Betrieb zum Zahnbruch als Folgeschaden.

Anschmelzungen wurden im trockenlaufenden Betrieb vor allem bei Werkstoffen mit höheren Reibungskoeffizienten beobachtet. Sie traten überwiegend erst ab einer bestimmten Lastgrenze (Anschmelzgrenzlast) auf. Dort überschreitet die Zahnflankentemperatur die Schmelztemperatur des Werkstoffes. Den Kunststoffzahnradern wird in diesem Fall mehr Wärme zu- als abgeführt. Dadurch wird keine stationäre Zahntemperatur erreicht. Die Zahnmassetemperatur steigt stetig. Aufgrund der Temperaturzunahme im Kunststoffzahn nehmen die mechanischen Festigkeiten soweit ab, bis sie für eine Kraftübertragung zu gering sind. Die Zähne erweichen oder werden innerhalb kürzester Zeit weggedrückt. Durch die Zugabe eines Trockenschmierstoffes und der damit vorhandenen Reduzierung des Reibungskoeffizienten erhöht sich die Anschmelzgrenzlast, beispielsweise bei PA66+15%AF+10%PTFE.

Abbildung 19 zeigt Anschmelzungen an einem Zahnrad aus PA66+20%AF im trockenlaufendem Betrieb. Bei diesem Werkstoff zeigte sich eine stark ausgeprägte Anschmelzlast. Bei Lasten bis $F_t/b = 25\text{N/mm}$ wurden hohe Zeitfestigkeiten ermittelt. Eine geringe Laststeigerung auf $F_t/b = 28\text{N/mm}$ zeigte dagegen ein sehr schnelles Anschmelzen der Flanken. Eine mögliche Erklärung für dieses Verhalten geben die Ergebnisse der Wirkungsgradmessungen (Kap. 5.3).

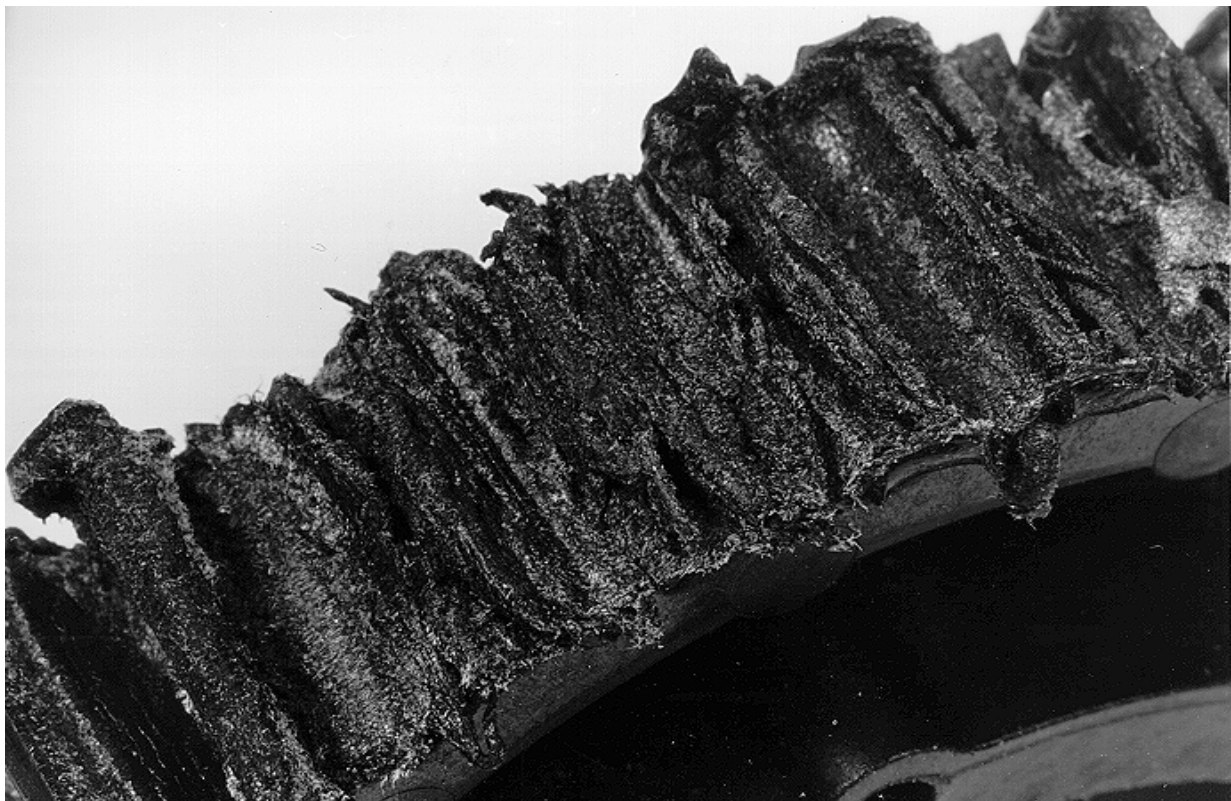


Abb. 19: Anschmelzungen der Zahnflanken bei $F_t/b = 28\text{N/mm}$, $N = 3 \cdot 10^4$ Lastspiele, PA66+20%AF/Stahl, trockenlaufend

Bei veränderten thermischen Verhältnissen verschieben sich die Anschmelzgrenzlasten. So ist z.B. bei erhöhten Umgebungstemperaturen aufgrund der verringerten Konvektion mit einer niedrigeren Anschmelzgrenzlast zu rechnen.

Zahnbruch an der Fußausrundung war bei den meisten untersuchten trockenlaufenden Kunststoffzahnradern (Abb. 20) zu beobachten. Brechen die Zahnräder aus den Grundwerkstoffen ohne Verstärkungsfasern im trockenlaufenden Betrieb in der aktiven Flanke (siehe Kap.2.2), so brechen die verstärkten Zahnräder dagegen im Zahnfuß. Die guten Verschleißigenschaften der gewählten Werkstoffe und die Faserorientierung parallel zu den Flanken (siehe Kap.3.3) vermindern die Anrissneigung im aktiven Flankenbereich. Das bedeutet, dass ehe es zu Anrissen aus Schub- und Druckspannungen im aktiven Bereich der Flanke kommen kann, erfolgt ein reiner Zahnbruch an der Fußausrundung.

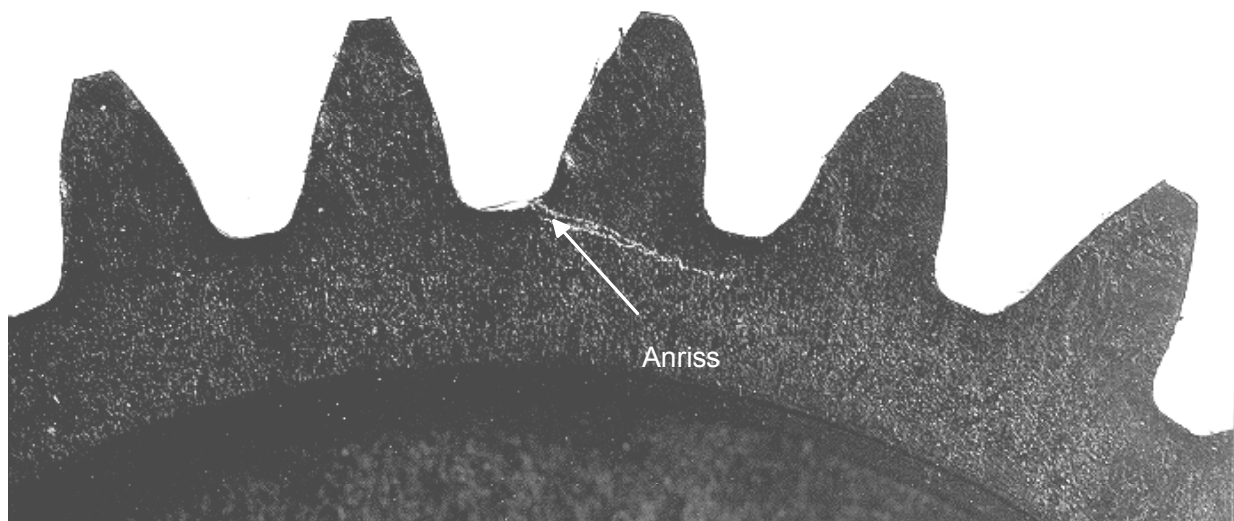


Abb. 20: Zahnfußbruch bei $F_t/b = 25\text{N/mm}$, $N = 11\ 603 \cdot 10^3$ Lastspiele, PA66+20%AF/Stahl, trockenlaufend

Zahnbruch an der Flanke

Diese Schadensart wurde besonders bei den ölgeschmierten Zahnrädern beobachtet. Abb. 21 zeigt diese Bruchbildung bei ölgeschmierten Zahnrädern aus PEEK 450G. Durch Überlagerungen von Schub- und Hertzschen Spannungen durch den Kontakt mit der Stahlzahnflanke im aktiven Zahnfußbereich kommt es zur Rissbildung. Der Anriss wächst aufgrund der Biegespannungen weiter bis der aktive Zahnbiegequerschnitt noch weiter verringert ist und die zulässige Biegespannung überschritten wird.

Diese Ausfallursache wurde auch teilweise bei trockenlaufenden Kunststoffzahnradern aus PA46 und bei PA66+20%AF beobachtet.

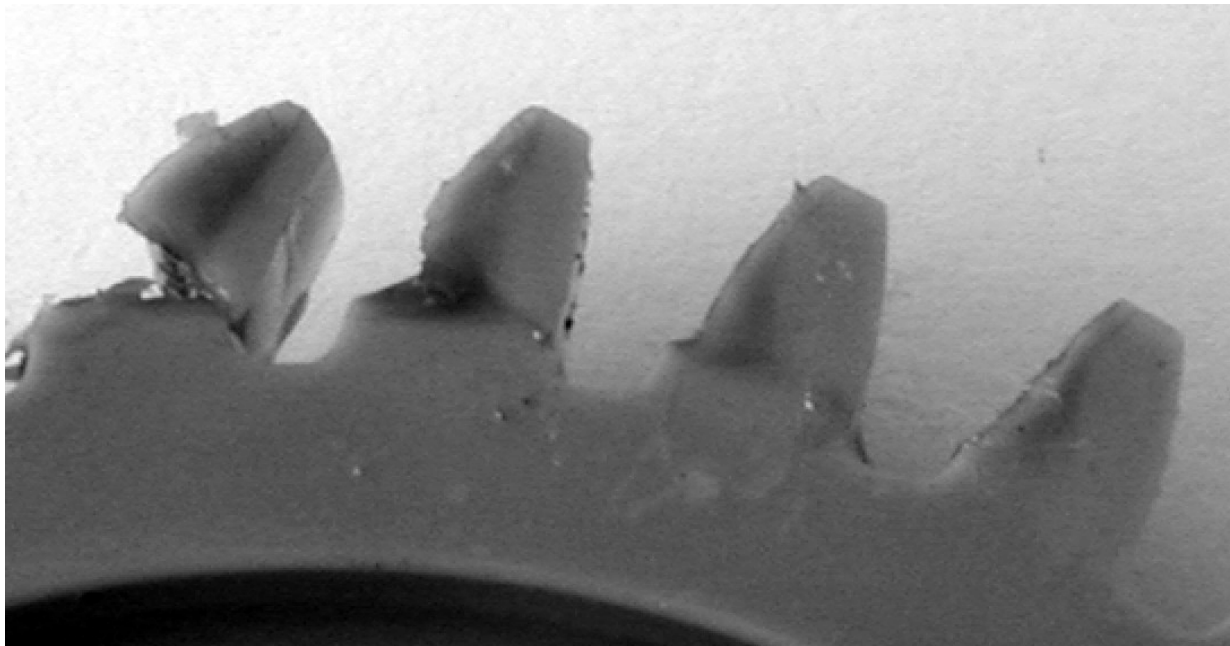


Abb. 21: Zahnbruch bei PEEK 450G als Folge der Grübchenbildung, Ölschmierung $F_t/b = 60\text{N/mm}$, $N = 476 \cdot 10^3$ Lastspiele

Grübchenbildung trat besonders bei geschmierten Paarungen und teilweise bei trockenlaufenden Kunststoff/Stahl - Paarungen auf. Bei geschmierten Zahnradern waren vor dem Anriss Grübchenbildungen zu beobachten, da durch die verringerte Reibleistung gegenüber dem trockenlaufenden Zahnrad die Wärmebildung an der Flanke geringer ist und der E-Modul weniger stark abfällt.

Bei sonst gleicher Verzahnungsgeometrie ist die Hertzsche Pressung nur von dem E-Modul des Kunststoffrades abhängig. Die aus dem hohen E-Modul resultierenden hohen Hertzschen Pressungen führen zur Grübchenbildung. Je höher der E-Modul umso stärker ist die sich ergebende Flankenbeanspruchung. Die Grübchenbildung begann auf der Höhe des Teilkreises und breitete sich im Betrieb über die gesamte Flanke aus (Abb. 22).

Nach Beginn der Grübchenbildung ist eine weitere zeitlich begrenzte Funktionserfüllung des Zahnradgetriebes gewährleistet. Wegen der verschlechterten Eingriffsbedingungen kommt es aber zu höheren inneren dynamischen Zusatzkräften, welche die Zahnbeanspruchungen erhöhen.

Durch die grübchenartige Ausbröckelung des Werkstoffes verringert sich zunehmend die Zahndicke, was eine Erhöhung der Biegebeanspruchung (bei gleich bleibender Last) nach sich zieht. Aufgrund der höheren dynamischen Zusatzkräfte und der

verringerten Zahndicke kommt es im weiteren Betrieb zu einem endgültigen Versagen der Zahnräder durch Zahnbruch.

Die Anrisse entstehen dabei im Bereich der aktiven Flanke und nicht in der Zahnfußausrundung (Abb. 21).

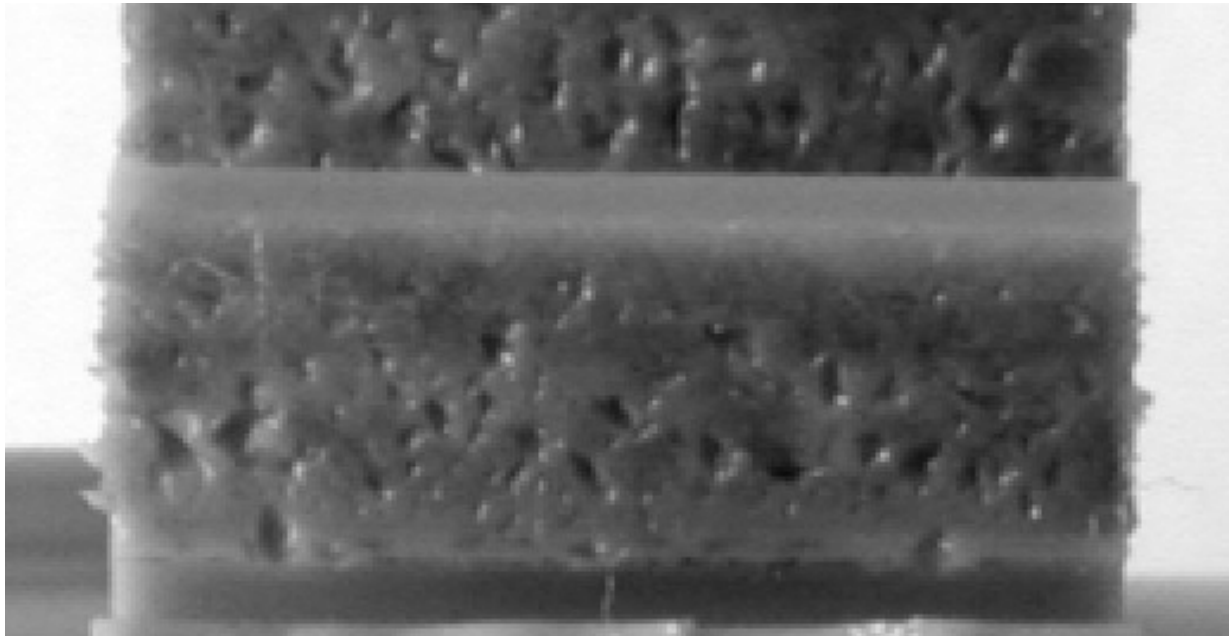


Abb. 22: Grübchenbildung bei PEEK 450G, Paarung Kunststoff/Stahl, 120°C Öltemperatur

Starke Grübchenbildung wurde bei Ölschmierung mit 120°C Öltemperatur an den Zahnrädern aus PEEK 450G festgestellt. Da der E-Modul von PEEK 450G bis zur Glasstemperatur ($T_g = 143^\circ\text{C}$) relativ konstant ist, ist zu erwarten, dass es auch bei geringeren Öltemperaturen zu einer ähnlich starken Grübchenbildung kommt. Bei einer Erhöhung der Öltemperatur auf über 150°C ist aufgrund des verringerten E-Moduls eher mit einer Abnahme der Grübchenbildung zu rechnen.

Wird PEEK mit Kohlenstofffasern (PEEK CA30) verstärkt, erhöht sich die Flankentragfähigkeit. Es waren keine Grübchen bei dieser Werkstoffkombination zu beobachten. Dies, obwohl es zu einer sehr starken Erhöhung des E - Moduls (PEEK 450G $E = 4,0 \text{ GPa}$, PEEK CA30 $E = 18,6 \text{ GPa}$) durch die Kohlenstofffasern und damit zu einer erhöhten Hertzschen Pressung kommt. Das zeigt, dass mit Kohlenstofffasern die Flankentragfähigkeit bei PEEK erhöht werden kann.

Im trockenlaufenden Betrieb war Grübchenbildung bei faserverstärkten Grundwerkstoffen nur mit zusätzlichem PTFE zu beobachten. Es ist davon auszugehen, dass das PTFE keinen ermüdungsfesten Werkstoffverbund mit dem Grundwerkstoff bildet, so dass sich einzelne Werkstoffpartikel aufgrund der

Hertzschen Pressung leichter abreißen können. Deutlich wird dies am Beispiel von Polyamid66 mit Aramidfasern. Während sich bei Polyamid66 mit 20% Aramidfasern keine Grübchenbildung zeigten (Abb. 24), trat bei Polyamid66+15%Aramidfasern und 10%PTFE Grübchenbildung (Abb. 23 und Abb. 25) auf. Das obwohl Polyamid66+20%Aramidfasern einen höheren E-Modul besitzt und sich damit eine höhere Hertzsche Pressung bei gleicher Linienlast einstellt.

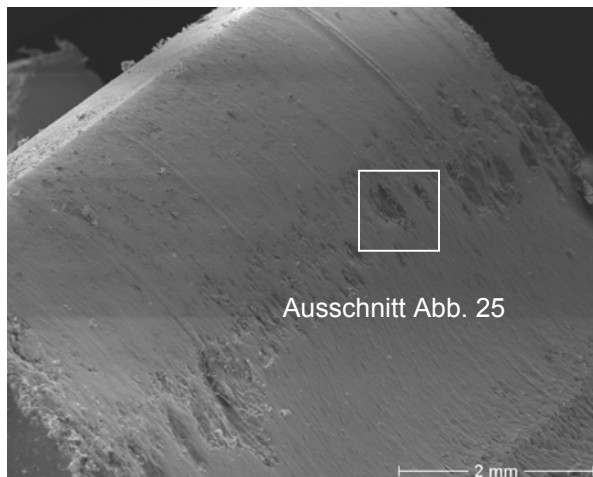


Abb. 23: Grübchenbildung in Teilkreisnähe an den Flanken von PA66+15%AF+10%PTFE

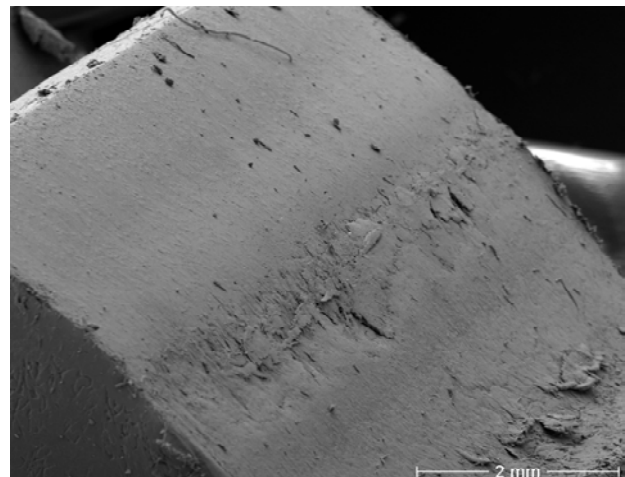


Abb. 24: Flanke von PA66+20%AF ohne Grübchenbildung

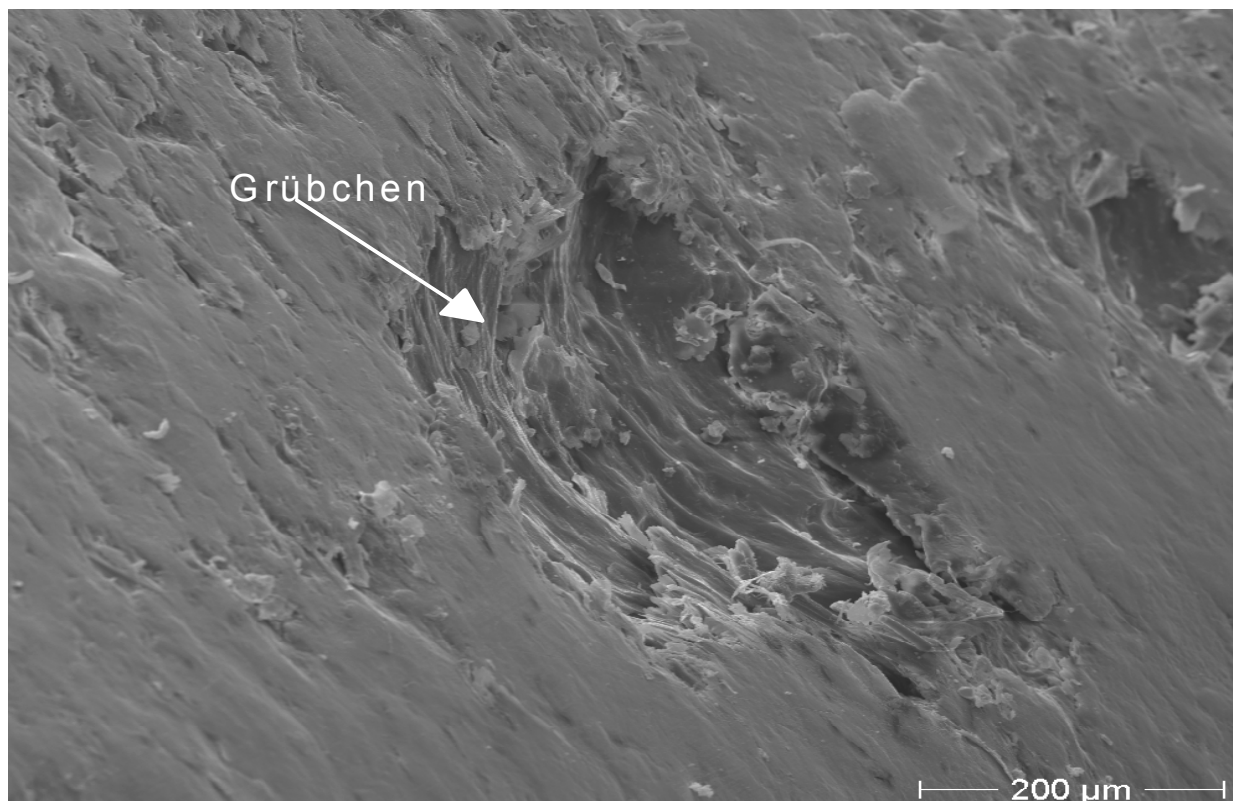


Abb.25: Grübchenbildung bei PA66+15%AF+10%PTFE

Abbildung 26 zeigt die Grübchenbildung bei modifiziertem PEEK FC30 im trockenlaufenden Betrieb. Bei diesem Werkstoff zeigte sich auch im Trockenlauf aufgrund des hohen E-Moduls Grübchenbildung an den Flanken.

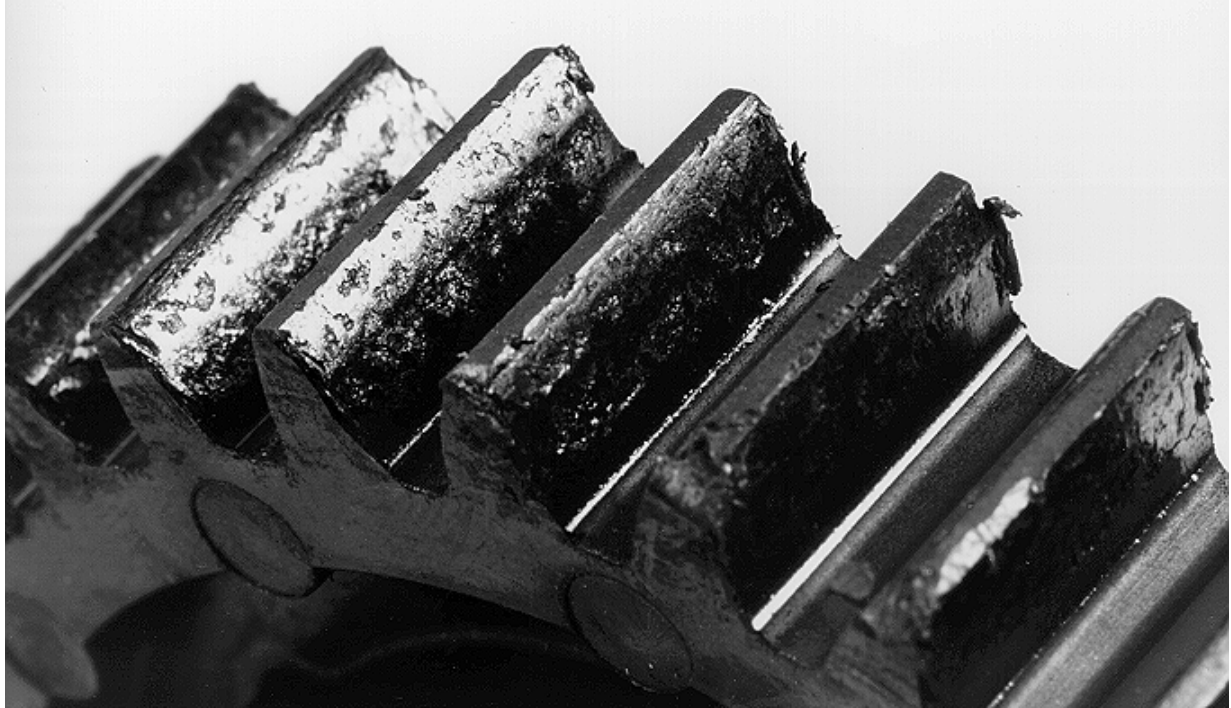


Abb. 26: Grübchenbildung über der Flanke bei PEEK FC30 gegen Stahl, trockenlaufend,
 $F_t/b = 20 \text{ N/mm}$

Übersicht über die beobachteten Schadensarten bei den untersuchten Kunststoffzahnradern

Eine Übersicht der aufgetretenen Schadensarten bei den untersuchten Kunststoffzahnradern und die entsprechenden Lastbereiche sind in den folgenden beiden Tabellen (Tab. 11 - 12) dargestellt.

Trockenlaufende Paarung Kunststoff/Stahl

Schadensart	Radwerkstoff	Lastbereich F_t/b
Anschmelzungen	PA66 [Heym-97]	$> 17 \text{ N/mm}$
	PA66+20%CF	$\geq 25 \text{ N/mm}$
	PA66+20%AF	$\geq 28 \text{ N/mm}$
	POM [Heym-97]	$> 22 \text{ N/mm}$
	POM+20%CF	$\geq 28 \text{ N/mm}$
	POM+10%AF+10%PTFE	$\geq 20 \text{ N/mm}$
	PA46	$\geq 20 \text{ N/mm}$
Zahnfußbruch	PEEK FC30	10 - 35 N/mm
	PA66+20%CF	18 - 28 N/mm
	PA66+20%AF	22 - 25 N/mm
	PA66+15%AF+10%PTFE	10 - 35 N/mm
	POM+20%CF	12 - 25 N/mm
	POM+10%AF+10%PTFE	12 - 20 N/mm
	PA66+20%AF (gefräst)	15 - 22 N/mm
	PA46	20 - 35 N/mm
Grübchenbildung	PEEK FC30	10 - 35 N/mm
	PA66+15%AF+10%PTFE	12 - 34 N/mm
	POM+10%AF+10%PTFE	12 - 22 N/mm
Zahnbruch an der Flanke	PA66 [Heym-97]	$\leq 17 \text{ N/mm}$
	POM [Heym-97]	$\leq 20 \text{ N/mm}$
	PA46	15 - 22 N/mm
	PA66+20%AF (vereinzelt)	22 N/mm

Tab. 11: Übersicht der Ausfallursachen bei den untersuchten Kunststoffzahnradern in der Paarung Kunststoff/Stahlritzel, trockenlaufend, $v_t = 7,5 \text{ m/s}$, $m = 2 \text{ mm}$

Ölgeschmierte Paarung Kunststoff/Stahl bei 120°C

Schadensart	Radwerkstoff	Lastbereich F_t/b
Zahnbruch an der Fußflanke	PEEK 450G	15 – 60 N/mm
	PEEK CA30	30 – 65 N/mm
	PEEK FC30	25 – 60 N/mm
Grübchenbildung	PEEK 450G	15 – 60 N/mm
	PEEK FC30	25 – 60 N/mm

Tab. 12: Übersicht der Ausfallursachen bei den untersuchten Kunststoffzahnradern in der Paarung Kunststoff/Stahlritzel, ölgeschmiert, $v_t = 7,5$ m/s, $m = 2$ mm

5.1.2 Versuchsauswertung

Bei der Versuchsauswertung ist zu beachten, dass für Kunststoffzahnradern keine Dauerfestigkeit erwartet werden kann. Vorangegangene Arbeiten (z.B. [Rems-65]) zeigten, dass hochbelastete Kunststoffzahnräder nur als zeitfest angesehen werden können.

Die bei den Untersuchungen ermittelten Lebensdauerwerte für Kunststoffzahnräder werden deutlich vom Prüfstandstyp beeinflusst. Ein direkter Vergleich mit anderen Untersuchungen ist wegen der unterschiedlichen Versuchsbedingungen, Werkstoff- und Qualitätsunterschiede nicht möglich [Baum-92].

Da statistisch abgesicherte Lebensdaueruntersuchungen mit einem enormen Versuchsaufwand verbunden sind, wird in dieser Arbeit nach einem Konzept zur Minimierung dieses Versuchsaufwandes gesucht. So zeigten sich bei der Auswertung der verschiedenen Kunststoffe bei gleichen Betriebsbedingungen überwiegend gleiche Steigungen und Streuungen der Wöhlerlinien trotz unterschiedlicher absoluter Tragfähigkeiten. Dies erlaubt einen Ansatz zur Normierung der Wöhlerlinien.

Das Konzept der normierten Wöhlerlinien beruht auf einem Grundgedanken, der erstmals mit Erfolg bei der Auswertung von Wöhlerlinien für geschweißte Verbindungen aus Baustahl verfolgt und sodann für eine zusammenfassende Auswertung der im Schrifttum verfügbaren Schwingfestigkeitswerte für Schweißverbindungen aus Baustahl und Schweißverbindungen aus Aluminiumlegierungen genutzt wurde. Dieses Konzept ermöglicht eine verallgemeinerungsfähige Beschreibung von Wöhlerlinien und hat in dieser Hinsicht eine breite statistische Absicherung erfahren [Haib-89].

Der zentrale Grundgedanke ist, dass Bauteile mit ähnlicher Geometrie, artgleichem Werkstoff und ähnlichen Versuchsbedingungen ein gleichartiges Versagensverhalten erwarten lassen und deshalb Versuchsergebnisse im Zeit- und Dauerfestigkeitsbereich durch eine geeignete Normierung ineinander überführt werden können. Dieser Gedanke kann natürlich auch auf Kunststoffzahnräder im Zeitfestigkeitsbereich übertragen werden [Mertens-03]. Artgleicher Werkstoff bedeutet in diesem Fall, dass die Normierung für teilkristalline thermoplastische Kunststoffe gilt. Da diese für Leistungsgetriebe die geeignetsten thermoplastischen Kunststoffe sind (siehe Kap. 1.2), ist eine erweiterte Betrachtung der Normierung auf die amorphen Thermoplaste in dieser Arbeit nicht erforderlich.

Bei einer doppelt - logarithmischen Auftragung der Versuchsergebnisse für trockenlaufende Zahnräder ergeben sich unmittelbar jeweils für die Paarung Kunststoff/Stahl gleiche Wöhlerliniensteigungen bei gleichem Schadensbild. Die Normierung erfolgt zweckdienlicherweise auf die Lastspielzahl, bei welcher der einzelne Werkstoff eine Linienlast von $F_t/b = 20 \text{ N/mm}$ im Mittel erreicht. Bei dieser Linienlast konnten alle gewählten Kunststoffzahnräder untersucht werden, wobei alle untersuchten Kunststoffzahnräder bei dieser Last das gleiche Schadensbild hatten. Weiterhin ergibt sich ein einheitliches Streuband mit einer einheitlichen Streubreite für die untersuchten trockenlaufenden Kunststoffzahnräder. Die Versuchsergebnisse von HEYM [Heym-97], welche unter gleichen Versuchsbedingungen ermittelt wurden und dieselben Schadensbilder aufweisen, werden zweckmäßigerweise bei der Normierung einbezogen (siehe Anhang A3).

Auch für ölgeschmierte Zahnradern kann eine geeignete Normierung angegeben werden. Aufgrund der erzielbaren höheren Tragfähigkeiten wird auf einer Linienlast von $F_t/b = 40 \text{ N/mm}$ normiert. Auch hier wurden die Linienlast wieder so gewählt, dass alle untersuchten ölgeschmierten Kunststoffzahnräder mit dem gleichem Schadensbild versagen.

Die Durchführung der Normierung wird im folgenden beispielhaft verdeutlicht. Wie bereits ausgeführt, werden die Ergebnisse der einzelnen Zeitfestigkeitsuntersuchungen hierzu in ein doppellogarithmisches Diagramm eingetragen (Abb. 27).

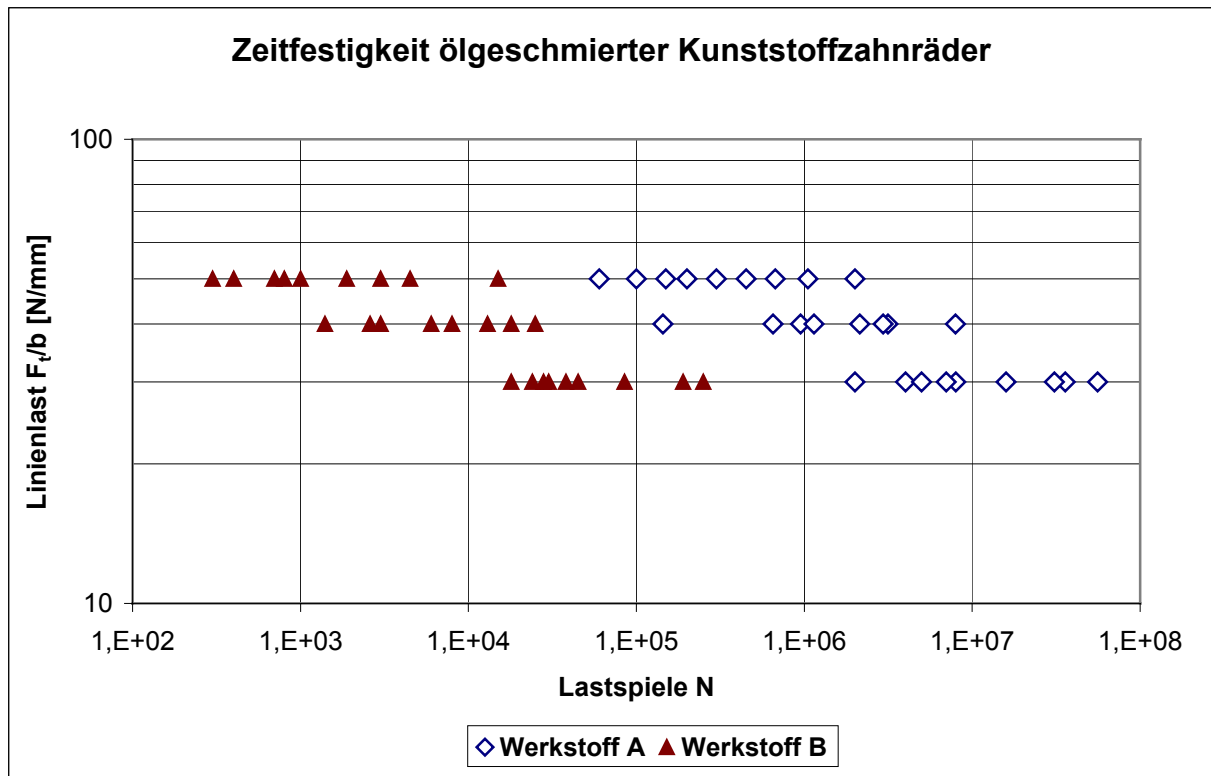


Abb. 27: Zeitfestigkeiten von Kunststoffzahnradern aus verschiedenen Werkstoffen

Anschließend werden die einzelnen Versuchsreihen horizontal so lange gegeneinander geschoben, bis ein weitestgehend gemeinsames Wöhlerstreuband erkennbar wird (Abb. 28).

Die Lastspielzahl, bei der 50% des jeweiligen Zahnradwerkstoffes bei einer Linienlast $F_t/b = 40$ N/mm versagen, wird zu eins normiert (Abb. 28). Aus den übereinander geschobenen Versuchspunkten lässt sich im nächsten Schritt die Streubreite abschätzen.

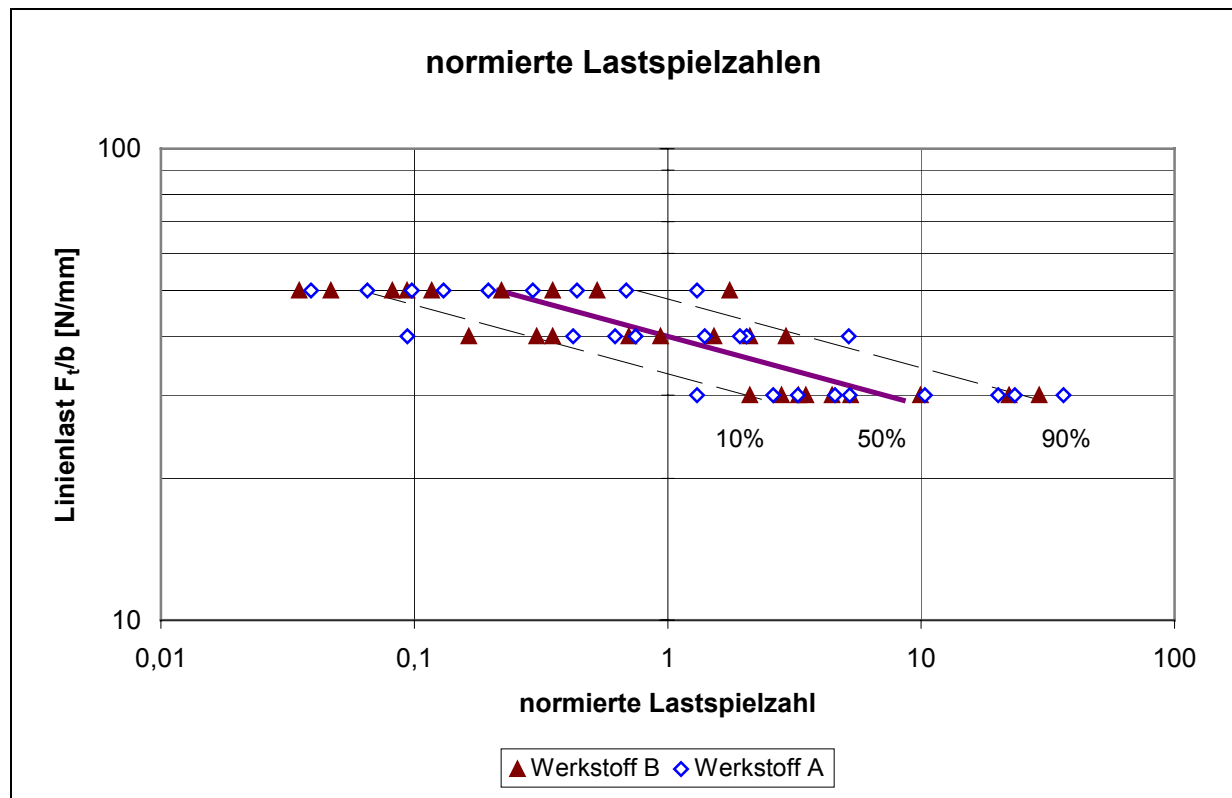


Abb.28: Normierung der Versuchsreihen

Eine mögliche Anwendung dieser Normierung wäre beispielsweise, wenn in ein bestehendes Kunststoffgetriebe ein anderer Kunststoff eingesetzt werden soll. Für das bestehende Kunststoffgetriebe sei die Wöhlerlinie bekannt. Unter der Annahme einer gleichen Wöhlerliniensteigung und -streubreite kann für den neuen Kunststoff mit wenigen Versuchen die Wöhlerlinie ermittelt werden (Abb. 29).

Dazu wird bei einer Linienlast von $F_t/b = 40$ N/mm die Bezugslastspielzahl mit 50% Ausfallwahrscheinlichkeit bestimmt (Abb. 29) und darauf das normierte Streuband gezeichnet. Zusätzlich ist die Änderung der Grenzlast für Anschmelzungen zu bestimmen, was ebenfalls mit wenigen Versuchen gelingen kann.

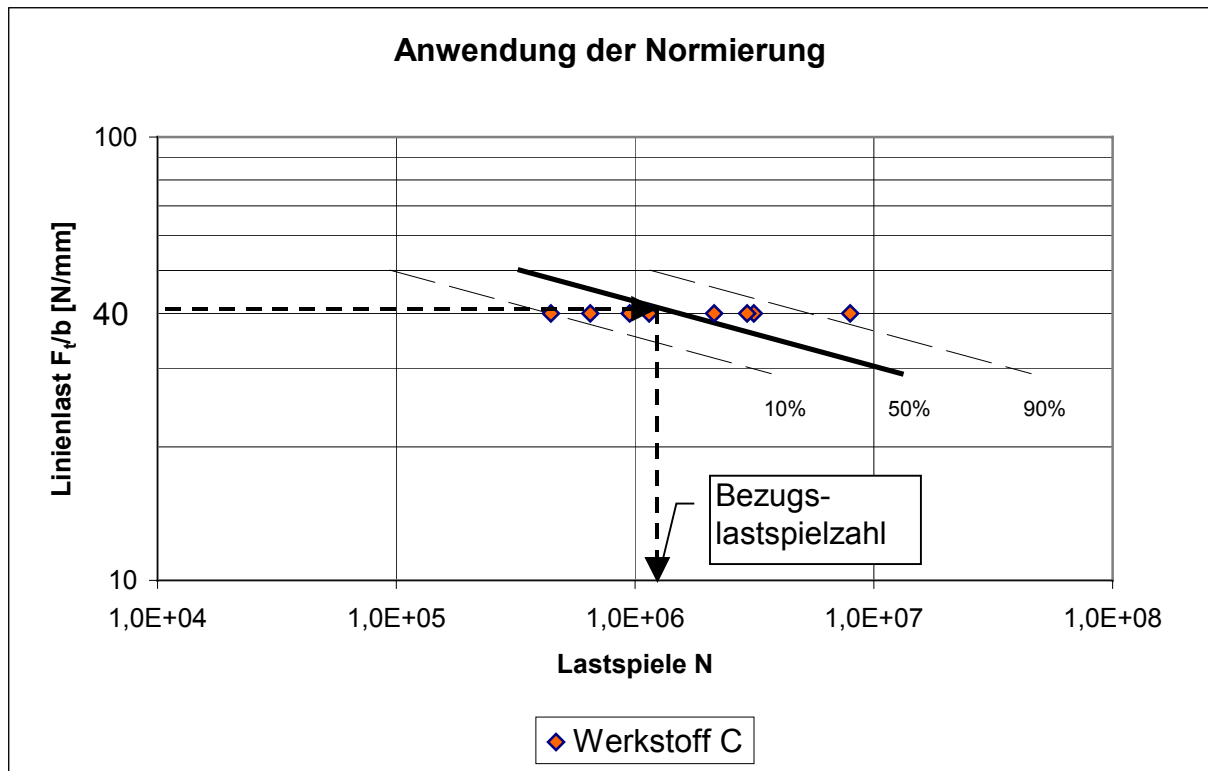


Abb. 29: Anwendung der Normierung

Mit dieser Normierung ergibt sich zum Beispiel für die ölgeschmierten Zahnräder folgende Gleichung zur Bestimmung der erreichbaren Lastspielzahl \bar{N} bei 50% Ausfallwahrscheinlichkeit:

$$\bar{N} = N_{40} \cdot \left(\frac{F_t/b}{40 \text{ N/mm}} \right)^{-k} \quad (5 - 1)$$

N_{40} – Bezugslastspielzahl für $F_t/b = 40 \text{ N/mm}$ im ölgeschmierten Betrieb

F_t/b – gewählte Linienlast [N/mm]

k – Exponent der Wöhlerkennlinie

\bar{N} – Lastspielzahl für die gewählte Linienlast bei 50% Ausfallwahrscheinlichkeit

Bei der Berechnung der Streubreite wird für jeden Versuchspunkt (F_t/b , N) der horizontale Abstand von der Mittellinie des Streubandes errechnet und in einer zusammenfassenden Streuanalyse behandelt.

Somit ergeben sich zum Beispiel die bezogenen logarithmischen Lastspielzahlen N^* für ölgeschmierte Zahnräder zu:

$$N^* = \log \left(\frac{N_i(F_t/b)}{\bar{N}(F_t/b)} \right) \quad (5 - 2)$$

Zur Abschätzung der Ausfallwahrscheinlichkeit $P(i)$ im Übergangsgebiet zur Dauerfestigkeit metallischer Werkstoffe existieren verschiedene Ansätze, wobei r = Anzahl der Ausfälle und n = Anzahl der Proben ist.

$$P(r) = \frac{r}{n} \quad (5 - 3)$$

$$P(r) = \frac{r+1}{n+1}, \text{ falls } r = n: P(n) = 0,5 \cdot \left(1 + \frac{n}{n+1}\right) \quad (5 - 4)$$

$$P(r) = \frac{r}{n+1}, \text{ falls } r = 0: P(0) = \frac{1}{2 \cdot n} \quad (5 - 5)$$

Die einfachste Form stellt (5 - 3) dar, bei der die Ausfallwahrscheinlichkeit über das Verhältnis der Anzahl der gebrochenen Proben zum Stichprobenumfang gebildet wird. Bei diesem Ansatz sind jedoch die beiden Extremfälle kritisch zu betrachten, bei denen alle Proben brechen bzw. alle Proben durchlaufen. Dies würde rechnerisch zu Ausfallwahrscheinlichkeiten $P(i) = 100\%$ bzw. $P(i) = 0\%$ führen, was aus technischer Sicht eine in der Realität nicht vorhandene Sicherheit wiedergäbe [Mae-81]. Eine Modifizierung dieser Annahme stellt die Formel (5 - 4) dar. Sie wurde von DENGEL [Den-75] für die Bestimmung der Ausfallwahrscheinlichkeiten im Übergangsgebiet vorgeschlagen und vielfach bei Dauerschwingversuchen an Maschinenelementen angewendet. Durch die Erhöhung der Anzahl der gebrochenen Proben und die Anzahl der Stichproben um jeweils eins kommt es zu einer Verschiebung der Funktion in Richtung der „sicheren Seite“. Die Verteilung wird dadurch unsymmetrisch, Ausfallwahrscheinlichkeiten von $P(i) = 0\%$ treten nicht mehr auf. Bei dem Ausfallwahrscheinlichkeitsgesetz nach der Formel (5 - 5) wird der Nachteil der Unsymmetrie weitgehend vermieden. Durch die Addition von eins im Nenner beinhaltet dieser Ansatz eine Korrektur der Stichprobe zur Grundgesamtheit hin [Mae-81] [Win-01].

Für die Auswertung von Versuchen im Zeitfestigkeitsbereich ist diese Art der Auswertung ungeeignet. Stattdessen werden hierzu die bezogenen logarithmischen Lastspielzahlen N^* in aufsteigender Reihenfolge (beginnend mit dem kleinsten Wert) geordnet und aufsteigend mit den Ordnungszahlen $i = 1 \dots n$ versehen, wobei n die Gesamtzahl aller Stichproben repräsentiert. Die Schätzung der Ausfallwahrscheinlichkeit $P(i)$ erfolgt analog der Gleichung (5 – 5) mit

$$P(i) = \frac{i}{n+1} \quad (5 - 6)$$

Für die weitere Auswertung werden die $P(i)$ -Werte und die relativen zugehörigen Streubandpositionen $P_{\arcsin(i)}$ entsprechend der $\arcsin \sqrt{P}$ -Funktion

$$P_{\arcsin(i)} = \arcsin(\sqrt{P(i)}) \cdot \frac{2}{\pi} \quad (5-7)$$

in Abb. A3 aufgetragen und hieraus die Streubreiten der $P(i)$ -Verteilung und der $P_{\arcsin(i)}$ -Verteilung abgeleitet.

Aus diesem Diagramm werden die bezogene Lastspielzahl $N_{90\%}^*$ für 90% Ausfallwahrscheinlichkeit sowie $N_{90\%,P_{\arcsin(i)}}^*$ für 90% der Streubandposition und die bezogene Lastspielzahl $N_{10\%}^*$ für 10% Ausfallwahrscheinlichkeit sowie $N_{10\%,P_{\arcsin(i)}}^*$ für 10% der Streubandposition abgelesen.

Mit dieser bezogenen Lastspielzahl kann nach der Gleichung:

$$N_{90\%} = \bar{N} \cdot 10^{N_{90\%}^*} \quad (5-8)$$

die Lastspielzahl für 90% Ausfallwahrscheinlichkeit bestimmt werden.

$$\text{Mit } N_{10\%} = \bar{N} \cdot 10^{N_{10\%}^*} \quad (5-9)$$

ergibt sich die Lastspielzahl für 10% Ausfallwahrscheinlichkeit.

Die Lastspielzahlen für die einzelnen Streubandpositionen werden analog mit:

$$N_{90\%,P_{\arcsin(i)}} = \bar{N} \cdot 10^{N_{90\%,P_{\arcsin(i)}}^*} \quad (5-10)$$

für 90% der Streubandposition und mit

$$N_{10\%,P_{\arcsin(i)}} = \bar{N} \cdot 10^{N_{10\%,P_{\arcsin(i)}}^*} \quad (5-11)$$

für 10% der Streubandposition ermittelt.

Die Eintragung in Abb. A5 und Abb. A6 zeigt, dass die Streuspanne der relativen Streubandpositionen die Versuchsergebnisse besser einfängt als die Streuspanne der Ausfallwahrscheinlichkeiten. Dies liegt daran, dass auch die jeweiligen \bar{N} -Werte der einzelnen Versuchsblöcke wegen der geringen Probenanzahl ebenfalls einer gewissen Streuung unterliegt (Vertrauensbereich des Mittelwertes). Bei der Auftragung der Messwerte werden deshalb die 10%- und die 90%-Werte des Streubandes entsprechend der $\arcsin \sqrt{P}$ -Funktion verwendet.

$$\text{Die Streuspanne } T_N \text{ ergibt sich aus } T_N = \frac{N_{10\%,P_{\arcsin(i)}}}{N_{90\%,P_{\arcsin(i)}}} \quad (5-12)$$

$N_{10\%,P_{\arcsin(i)}}$ - Lastspielzahl mit 10% der Streubandposition

$N_{90\%,P_{\arcsin(i)}}$ - Lastspielzahl mit 90% der Streubandposition

5.1.3 Tragfähigkeit ölgeschmierter Kunststoff/Stahl Paarungen

PEEK 450G

Aus Abb. 30 sind die Zeitfestigkeiten für Zahnräder aus unmodifiziertem PEEK 450G zu entnehmen.

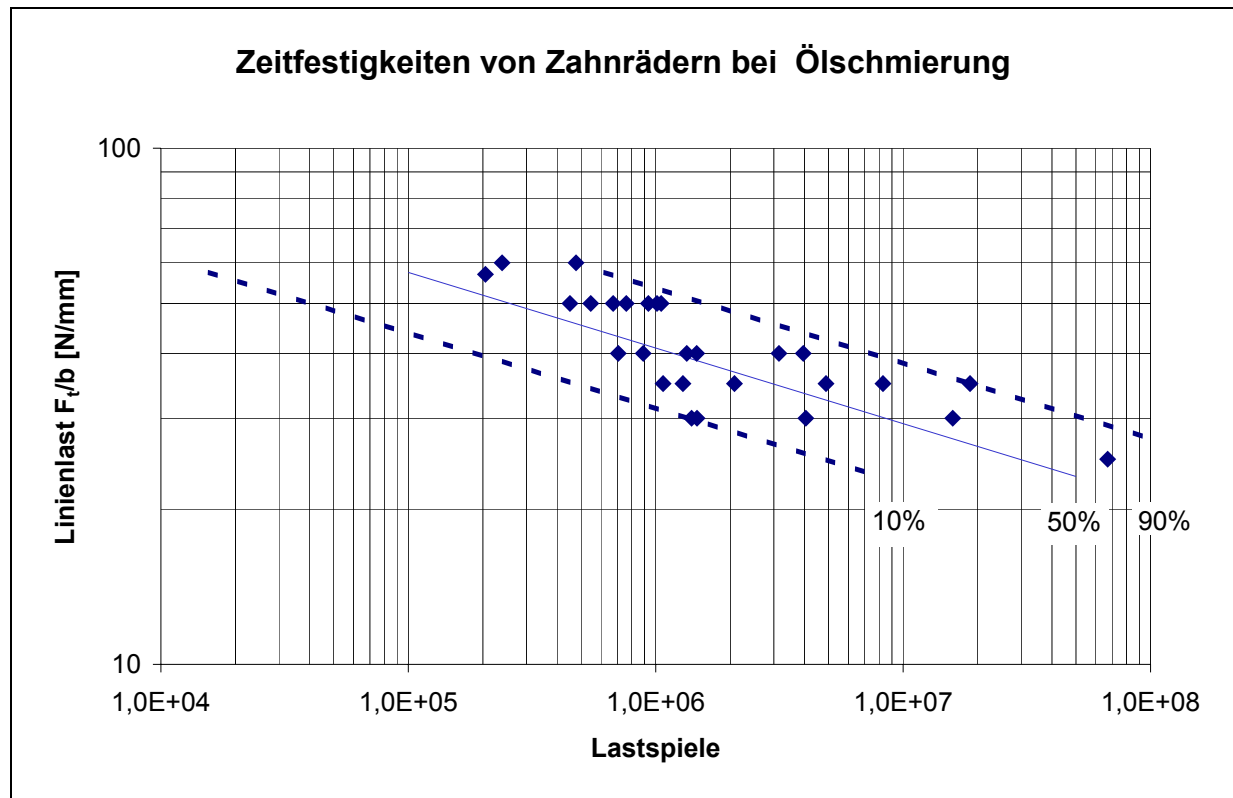


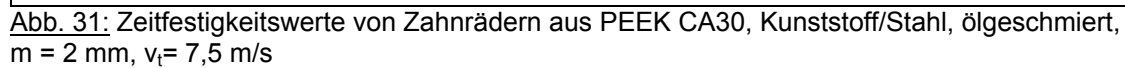
Abb. 30: Zeitfestigkeitswerte von Zahnrädern aus PEEK 450G Kunststoff/Stahl, ölgeschmiert, $m = 2 \text{ mm}$, $v_t = 7,5 \text{ m/s}$

Die Zahnräder weisen eine starke Grübchenbildung über der gesamten Flanke auf. Sie versagten durch Zahnfußbruch, ausgehend von der aktiven Flanke. Die Anrisse sind die Folge der Grübchenbildung.

PEEK CA30

Bei den Zahnrädern aus PEEK CA30 zeigten sich höhere Zeitfestigkeitswerte (Abb.31) gegenüber unmodifiziertem PEEK 450G (Abb. 33). Grund dafür ist die erhöhte Biegefestigkeit bei PEEK CA30, welche durch den Zusatz von Kohlenstofffasern erreicht wird.

Ausfallursache bei den ölgeschmierten Zahnrädern aus PEEK CA30 war im Wesentlichen der Zahnbruch an der Flanke. Es kam nur zu sehr kleinen Grübchen. Die Zugabe von Kohlenstofffasern bei PEEK führt trotz Erhöhung des E-Moduls und



Die Zahnräder aus PEEK FC30 zeigten im gesamten Lastbereich, trotz Faserverstärkung, aber mit inkorporiertem Schmierstoff, geringere Tragfähigkeiten als das unverstärkte PEEK 450G (Abb. 30 und Abb. 32). Dies zeigt, dass die Zugabe von PTFE bei PEEK den positiven Einfluss der Kohlenstofffasern auf die Tragfähigkeit (siehe PEEK CA30) stark verringert.

65

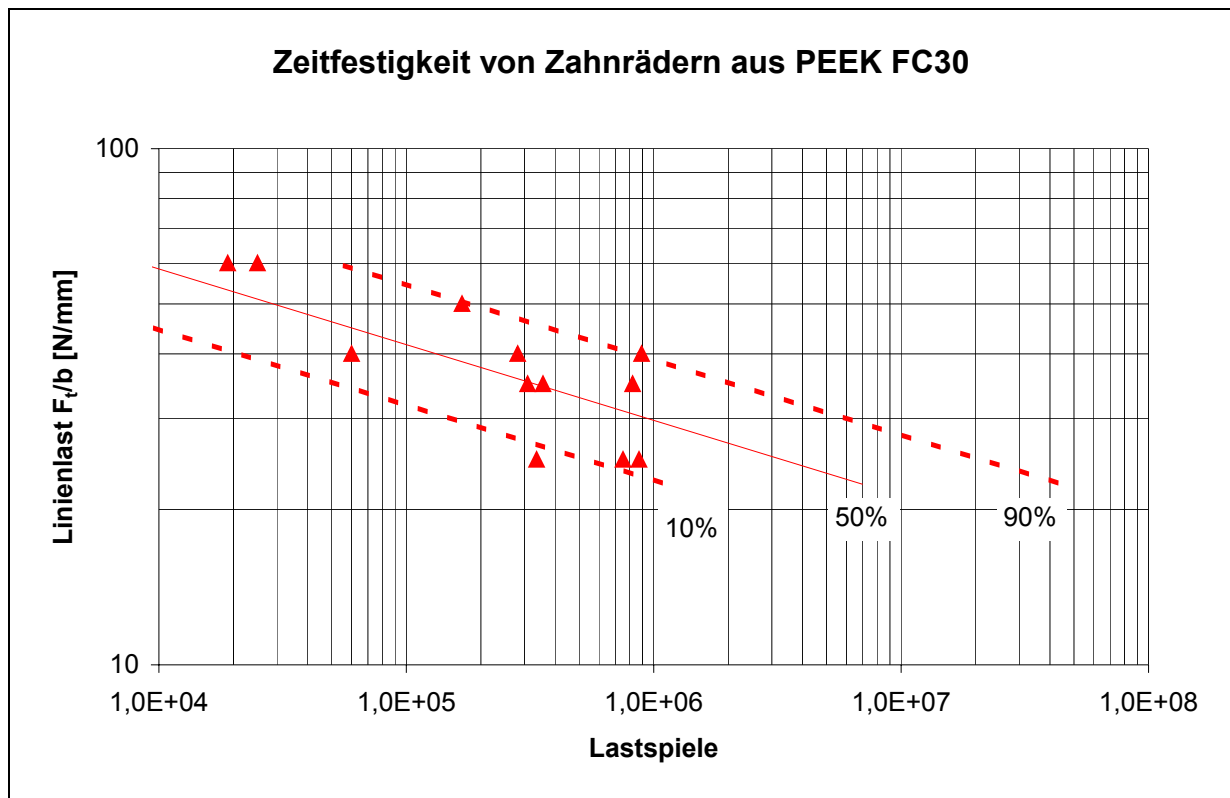


Abb. 32: Zeitfestigkeitswerte von Zahnrädern aus PEEK FC30, Kunststoff/Stahl, ölgeschmiert, $m = 2\text{mm}$, $v_t = 7,5\text{m/s}$

5.1.4 Vergleich der ermittelten Tragfähigkeiten für die ölgeschmierten Zahnräder

Aus Abb. 33 sind eindeutig die Tendenzen der Tragfähigkeiten ölgeschmierter Zahnräder erkennbar. So ist PEEK CA30 dem PEEK 450G und dem PEEK FC30 in der Tragfähigkeit überlegen. PEEK FC30 weist die geringsten Tragfähigkeiten der untersuchten Kunststoffe auf. Daraus lässt sich ableiten, dass im ölgeschmierten Betrieb die reibungsmindernden Zusätze wie PTFE und Graphit bei PEEK keine Steigerung der Tragfähigkeit bewirken. Der Einsatz von Kohlenstofffasern brachte dagegen sowohl eine Erhöhung der Flankentragfähigkeit als auch der Zahnfußtragfähigkeit.

Weiterführende Untersuchungen sind mit PEEK CA30 und höheren Verzahnungsqualitäten zu empfehlen. Um die Vorteile des Hochtemperaturthermoplastes PEEK weiter nutzen zu können, wären Versuche bei höheren Öltemperaturen mit PEEK und PEEK CA30 notwendig. Weitergehende Untersuchungen mit PEEK FC30 sind aufgrund der vorliegenden Untersuchungsergebnisse nicht lohnenswert.

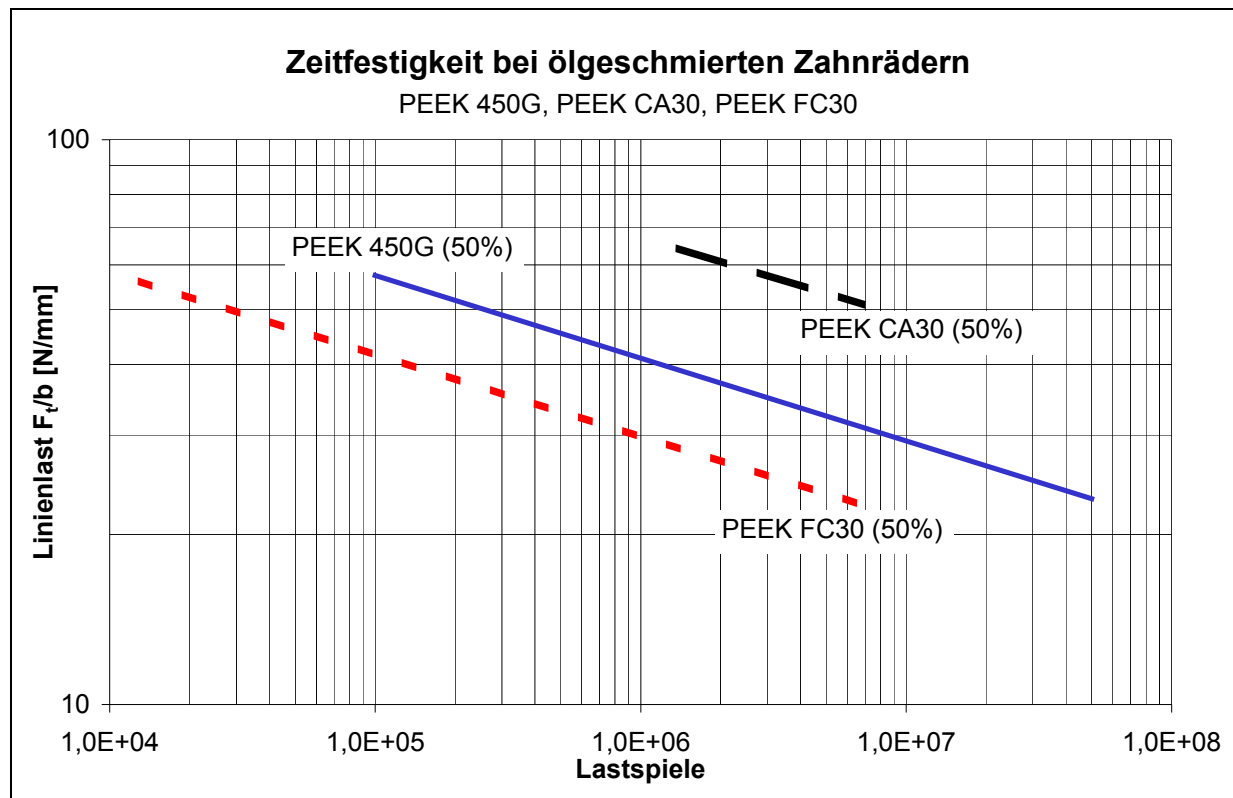


Abb. 33: Vergleich der Zeitfestigkeiten der untersuchten ölgeschmierten Kunststoffe, $m = 2$ mm, $v_t = 7,5$ m/s, Paarung Kunststoff/Stahl (Ausfallwahrscheinlichkeit)

Tabelle 13 zeigt zur besseren Übersicht die Parameter der einzelnen Wöhlerlinien für die jeweiligen Werkstoffe.

Werkstoff	Exponent k	Bezugslastspielzahl N_{40} [Lastspiele]	Streuspanne T_N
PEEK CA30	6,83	$3,558 \cdot 10^7$	1:39,7
PEEK 450G	6,83	$0,119 \cdot 10^7$	1:39,7
PEEK FC30	6,83	$0,013 \cdot 10^7$	1:39,7

Tab. 13: Gegenüberstellung der normierten Zeitfestigkeitskennwerte der untersuchten ölgeschmierten Kunststoffzahnäder

5.1.5 Tragfähigkeit trockenlaufende Kunststoff/Stahlpaarungen

PA66+20%AF

Die vorliegenden Versuchsergebnisse zeigen, dass mit den spritzgegossenen Zahnrädern aus PA66+20%AF selbst bei hohen Lasten ($F_t/b = 25\text{N/mm}$) hohe Lebensdauern erreicht werden können (Abb. 34). Die Tragfähigkeitswerte dieses Kunststoffes liegen über denen von POM, dem bisherigen Standardkunststoff für Zahnräder. Die Eignung von PA66+20%AF als Zahnradwerkstoff wurde bereits von HEYM [Heym-97] ermittelt.

Bei sehr hohen Lasten ($F_t/b = 28\text{ N/mm}$) kommt es innerhalb weniger Minuten zum Anschmelzen und damit zum völligen Versagen der Zahnräder (Abb. 35). Der starke Unterschied in den Lebensdauern zwischen $F_t/b = 25\text{N/mm}$ und $F_t/b = 28\text{ N/mm}$ kann anhand des Wirkungsgradverlaufes über der Zeit bei diesen Zahnrädern erklärt werden (siehe Kap. 5.3). Der Wirkungsgrad steigt über einen langen Zeitraum (360 min) langsam an. Kommt es während dieser Anstiegszeit bei der niedrigeren Linienlast nicht zu Anschmelzungen, so bleibt der temperaturbedingte Festigkeitsabfall gering und es werden relativ hohe Zeitfestigkeiten erreicht. Bei der höheren Last ist die Wärmeeinbringung höher, so dass es zu den schnellen Anschmelzungen kommt. Eine Erhöhung der Anschmelzgrenzlast ist durch die Zugabe von Trockenschmierstoffen und der daraus resultierenden Reibungsverminderung zu erwarten. Dies zeigte sich in den folgenden Versuchen mit PA66+15%AF+10%PTFE.

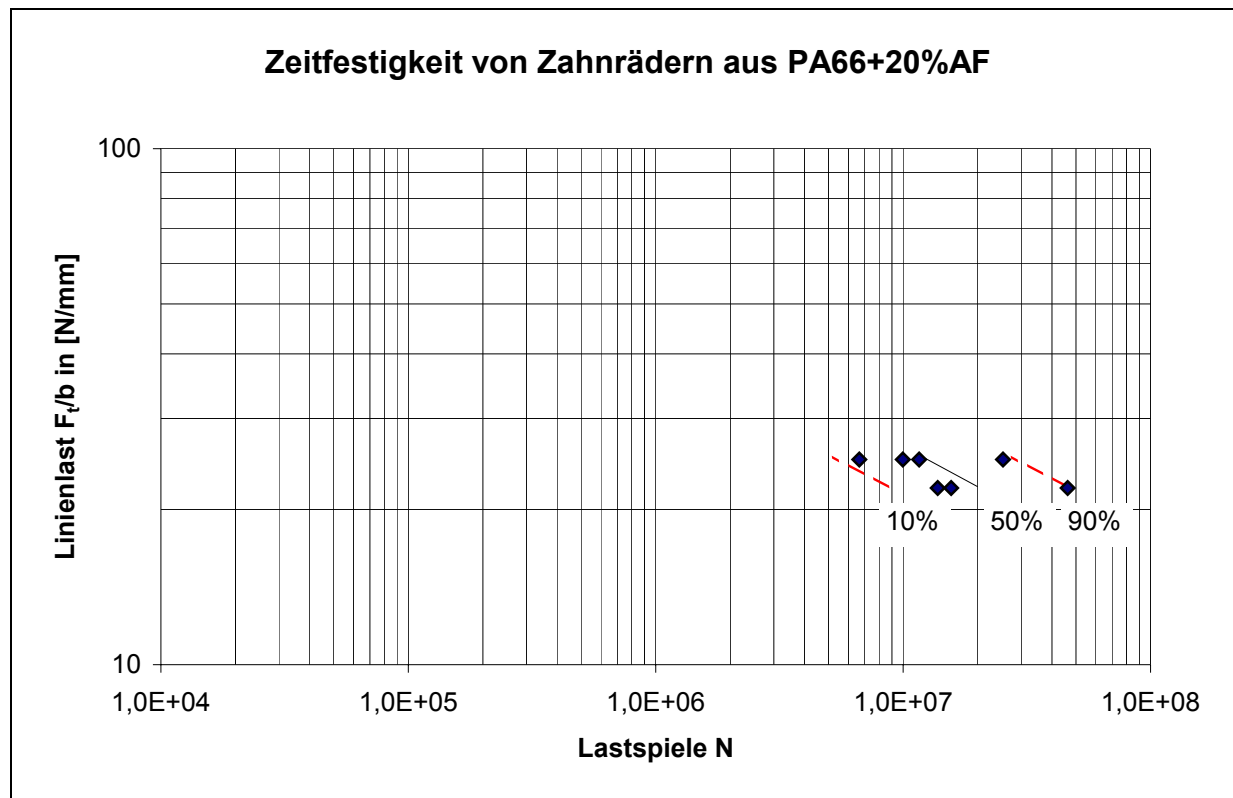


Abb. 34: Zeitfestigkeiten von spritzgegossenen Kunststoffzahnradern aus PA66 mit Aramidfasern (PAAFs) im Trockenlauf, $m = 2 \text{ mm}$, $v_t = 7,5 \text{ m/s}$, Kunststoff/Stahl

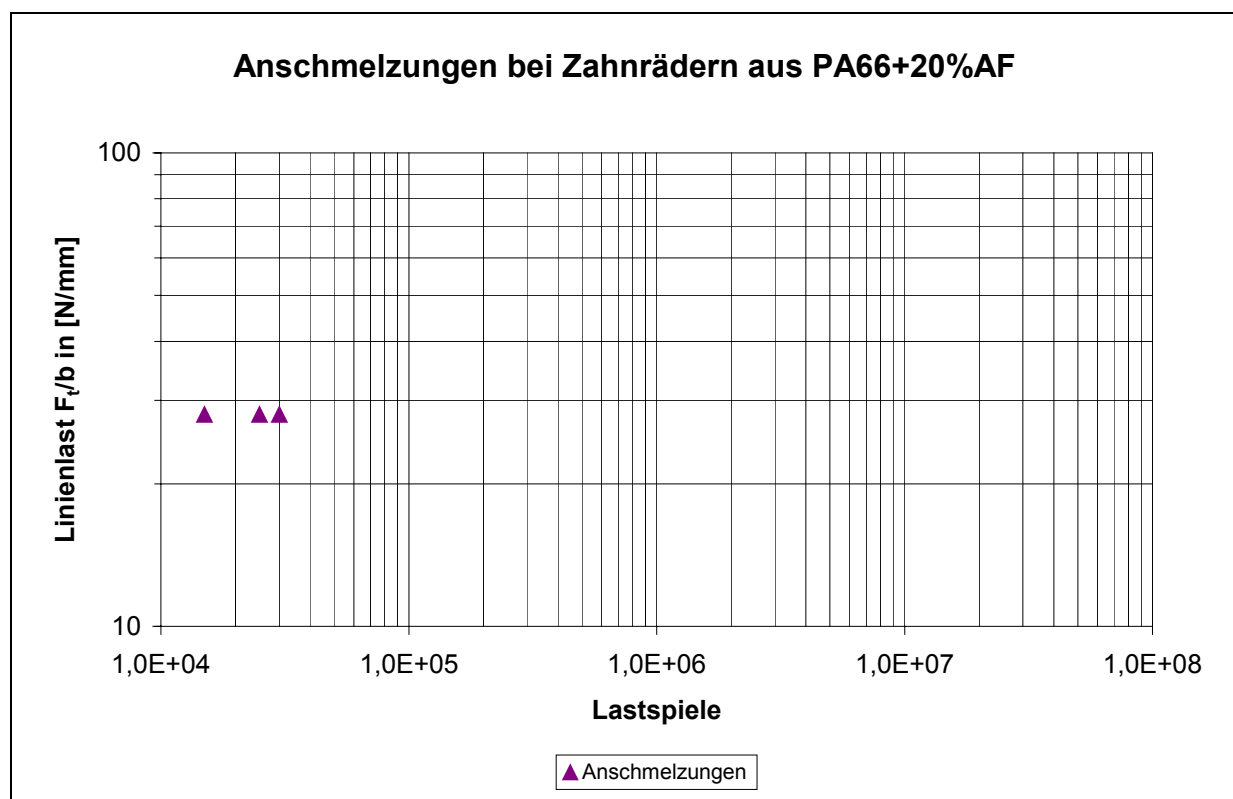


Abb. 35: Anschmelzungen bei spritzgegossenen Kunststoffzahnradern aus PA66 mit Aramidfasern (PAAFs) im Trockenlauf, $m = 2 \text{ mm}$, $v_t = 7,5 \text{ m/s}$, Kunststoff/Stahl

Die gefrästen (PAAFG) Kunststoffzahnräder sind den spritzgegossenen (PAAFs) in der Lebensdauer weit unterlegen (Abb. 34) und (Abb. 36). Dieser Unterschied kann mit der verschiedenen Faserorientierung der beiden Fertigungsarten erklärt werden. Während die Fasern im gefrästen Zahnrad nicht beanspruchungsgerecht liegen, sind sie bei den spritzgegossenen Zahnradern im Zahnfußbereich eher parallel zu den Zahnflanken ausgerichtet (siehe Kap. 3.3).

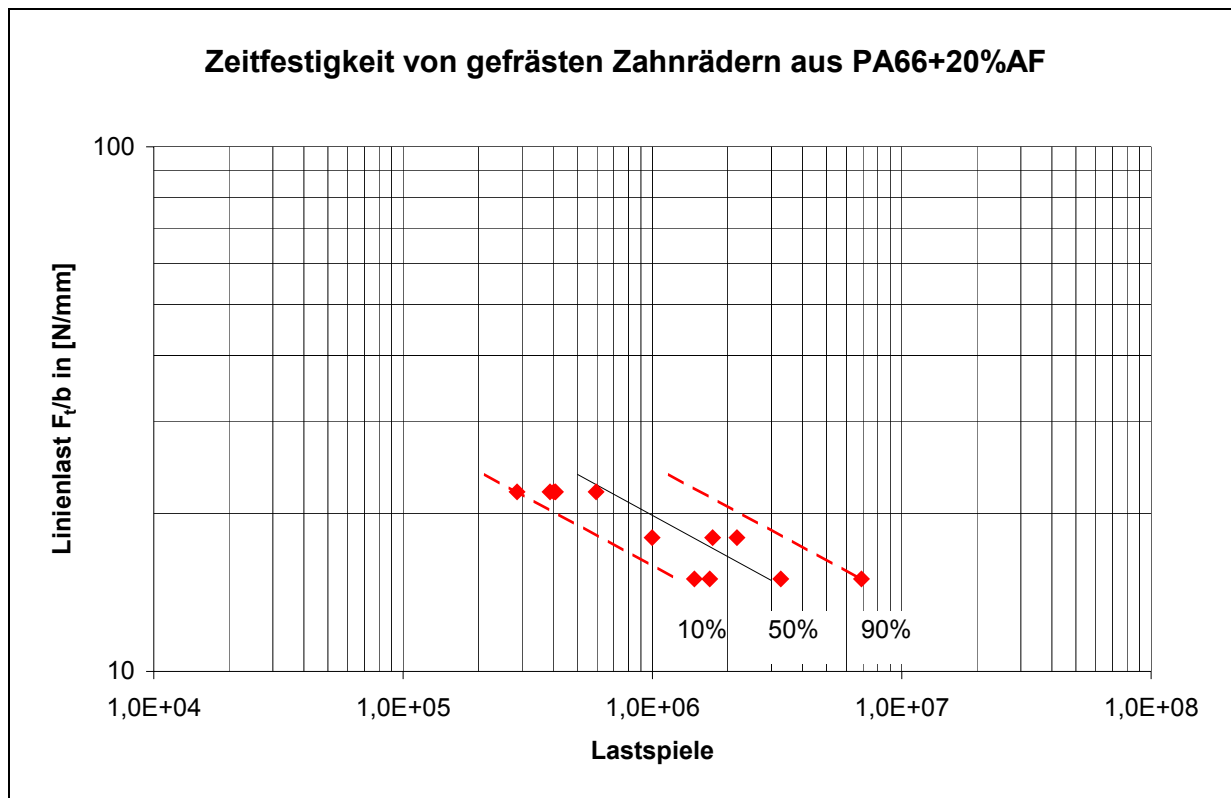


Abb. 36: Zeitfestigkeiten von gefrästen Kunststoffzahnradern aus PA66 mit Aramidfasern im Trockenlauf, $m = 2\text{mm}$, $v_t = 7,5\text{m/s}$, Kunststoff/Stahl

PA66+15%AF+10%PTFE

Durch die Zugabe von reibungsmindernden Zusätzen (PTFE) bei PA66 mit Aramidfasern kam es erwartungsgemäß zu einer verringerten Reibleistung und damit zu einer geringeren Temperatur im Kunststoffzahnrad. Daher liegt die Anschmelzlast deutlich höher als bei reinem PA66 mit Aramidfasern. Im untersuchten Lastbereich ($F_t/b = 12 - 34 \text{ N/mm}$) konnte keine Anschmelzlast festgestellt werden (Abb. 37). Gleichzeitig zeigte sich im mittleren und unteren Lastbereich ($F_t/b < 20\text{N/mm}$) eine Verringerung der Lebensdauer. Ursache dafür ist die Verringerung der Festigkeiten durch die Zugabe von PTFE zum PA66 mit Aramidfasern. Die ermittelten Zeitfestigkeiten sind in diesen Lastbereichen vergleichbar mit denen von POM.

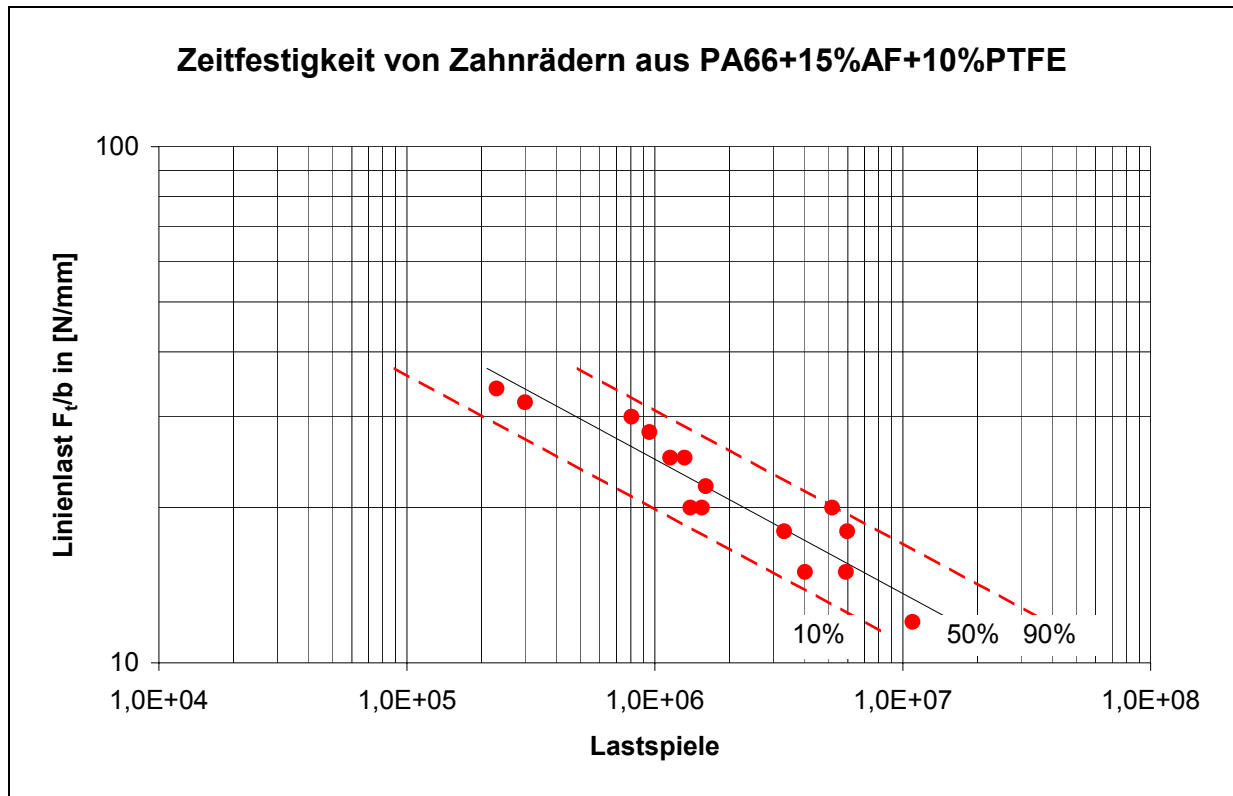


Abb. 37: Zeitfestigkeiten von Kunststoffzahnradern aus PA66+15%AF+10%PTFE im Trockenlauf, $m=2\text{mm}$, $v_t=7,5\text{m/s}$, Kunststoff/Stahl

Ausfallursache war in allen Lastbereichen Zahnfußbruch. Weiterhin zeigte sich in allen Lastbereichen leichte Grübchenbildung in Teilkreisnähe. Dies, obwohl die Hertzsche Pressung bei gleicher Linienlast aufgrund des kleineren E-Moduls geringer ist. Dies zeigt, dass durch die Zugabe von PTFE zu PA66 mit Aramidfasern die Flankenbeanspruchbarkeit herabgesetzt wird. Ursache dafür ist ein unzureichender Verbund des PA66 mit dem PTFE. HEYM [Heym-97] stellte bei PA66+PE ebenfalls Grübchenbildung im trockenlaufenden Betrieb fest.

Eine Zugabe von anderen reibungsmindernden Zusatzstoffen, wie z.B. Silikon, könnte bei PA66 mit Aramidfasern erfolgreicher sein. So verringert Silikon schon in geringen Mengen sehr deutlich den Reibungskoeffizienten, hat aber bei geringen Mengen fast keine Wirkung auf die mechanischen und thermischen Eigenschaften.

POM+10%AF+10%PTFE

Abb. 38 und Abb. 39 zeigen die Tragfähigkeiten der Zahnräder von POM+10%AF+10%PTFE. Es zeigen sich kaum Verbesserungen in der Zeitfestigkeit gegenüber dem unmodifizierten Grundwerkstoff POM (siehe Kap. 7).

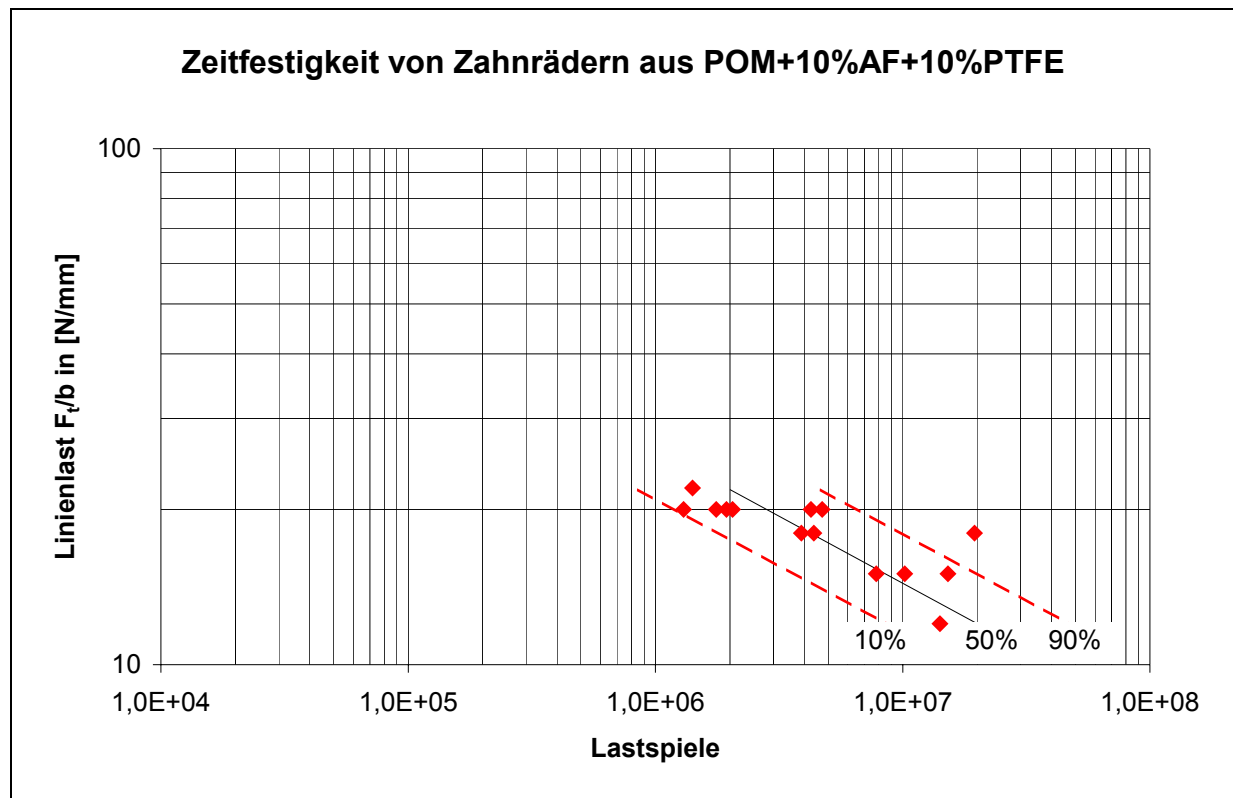


Abb. 38: Zeitfestigkeiten von Kunststoffzahnradern aus POM+10%AF+10%PTFE im Trockenlauf, $m = 2 \text{ mm}$, $v_t = 7,5 \text{ m/s}$, Kunststoff/Stahl

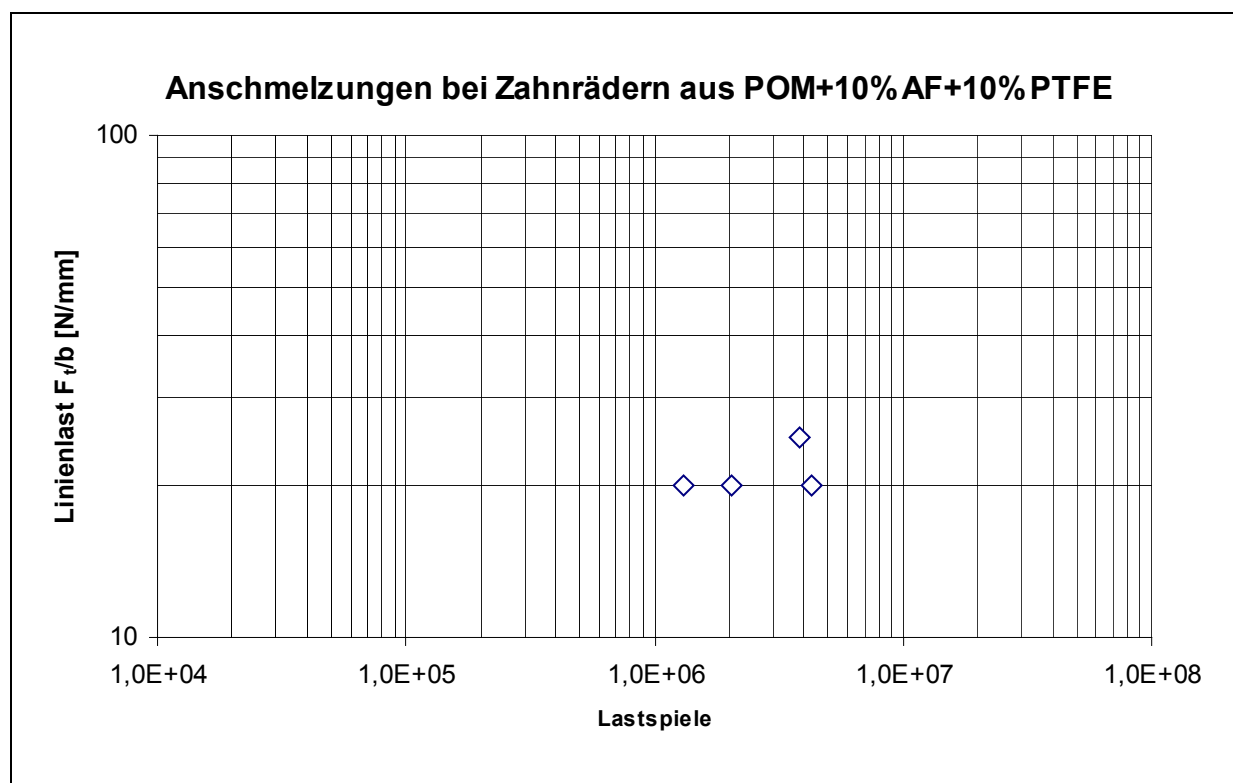


Abb. 39: Anschmelzungen bei Kunststoffzahnradern aus POM+10%AF+10%PTFE im Trockenlauf, $m = 2 \text{ mm}$, $v_t = 7,5 \text{ m/s}$, Kunststoff/Stahl

Die Zahnräder fielen überwiegend durch Zahnfußbrüche aus. Ab einer Linienlast von $F_t/b=20\text{ N/mm}$ zeigten sich Anschmelzungen.

PA66+20%CF

Bei PA66 bewirkt die Kohlenstofffaserverstärkung eine deutliche Tragfähigkeitsteigerung in allen untersuchten Lastbereichen ($F_t/b = 18 - 28 \text{ N/mm}$) gegenüber dem unmodifizierten PA66 (Abb. 40). Diese Tragfähigkeitssteigerung ist aber geringer als bei Aramidfaserverstärkung (Abb. 34). Ausfallursache ist Zahnfußbruch und ab $F_t/b = 25 \text{ N/mm}$ Anschmelzungen.

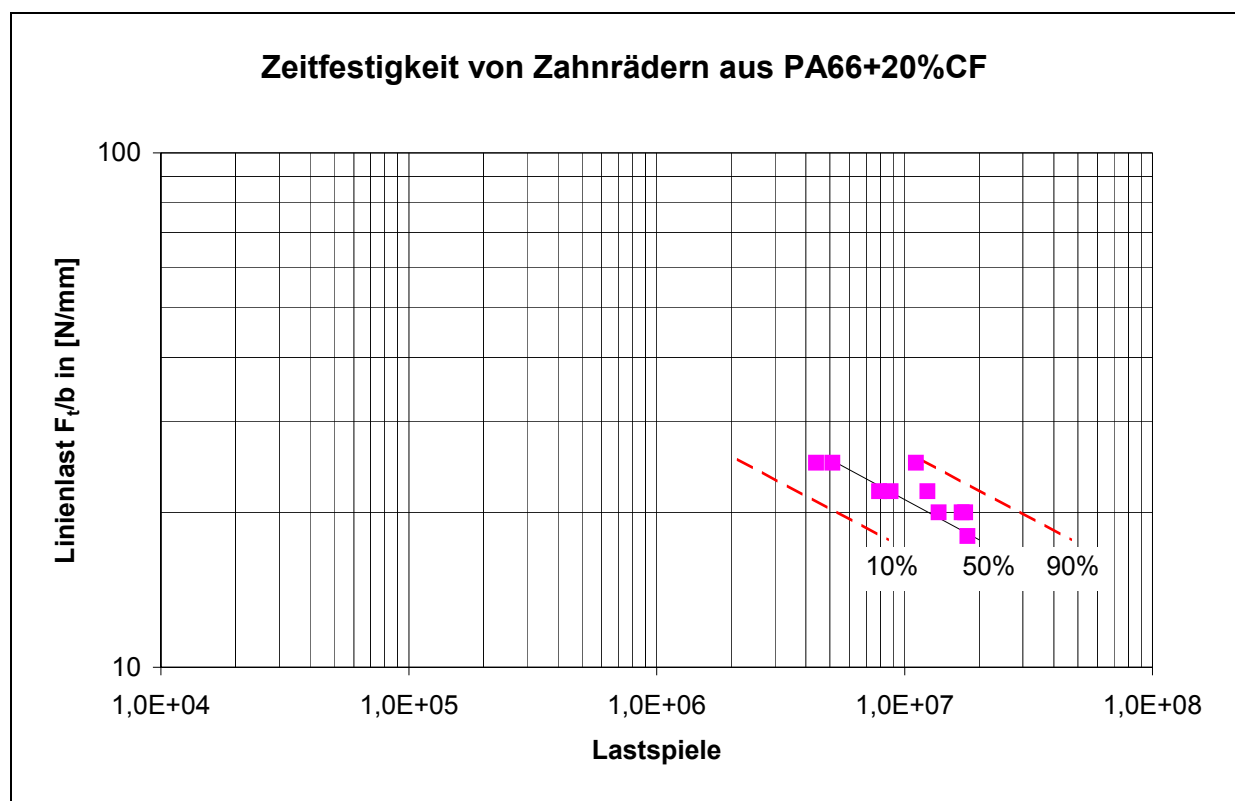


Abb. 40: Zeitfestigkeiten von Kunststoffzahnradern aus PA66+20%CF im Trockenlauf, $m = 2 \text{ mm}$, $v_t = 7,5 \text{ m/s}$, Kunststoff/Stahl

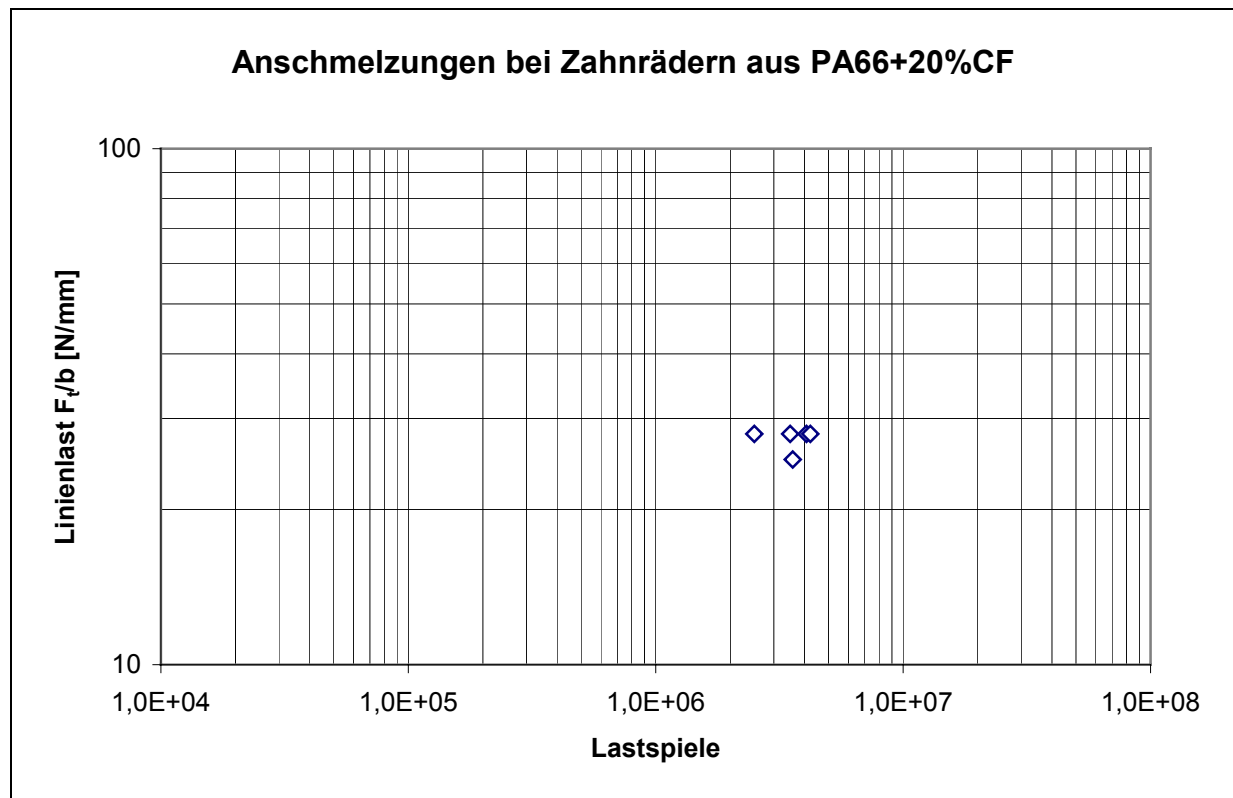


Abb. 41: Anschmelzungen von Kunststoffzahnradern aus PA66+20%CF im Trockenlauf, $m = 2$ mm, $v_t = 7,5$ m/s, Kunststoff/Stahl

POM+20%CF

Bei den kohlenstofffaserverstärkten POM zeigten sich gegenüber unmodifiziertem POM nicht so deutliche Tragfähigkeitsteigerungen wie bei PA66 (siehe Kap.7). Die Zahnräder fielen durch Zahnfußbrüche ([Abb. 42](#)) und ab einer Linienlast von $F_t/b = 28$ N/mm auch durch Anschmelzungen aus ([Abb. 43](#)).

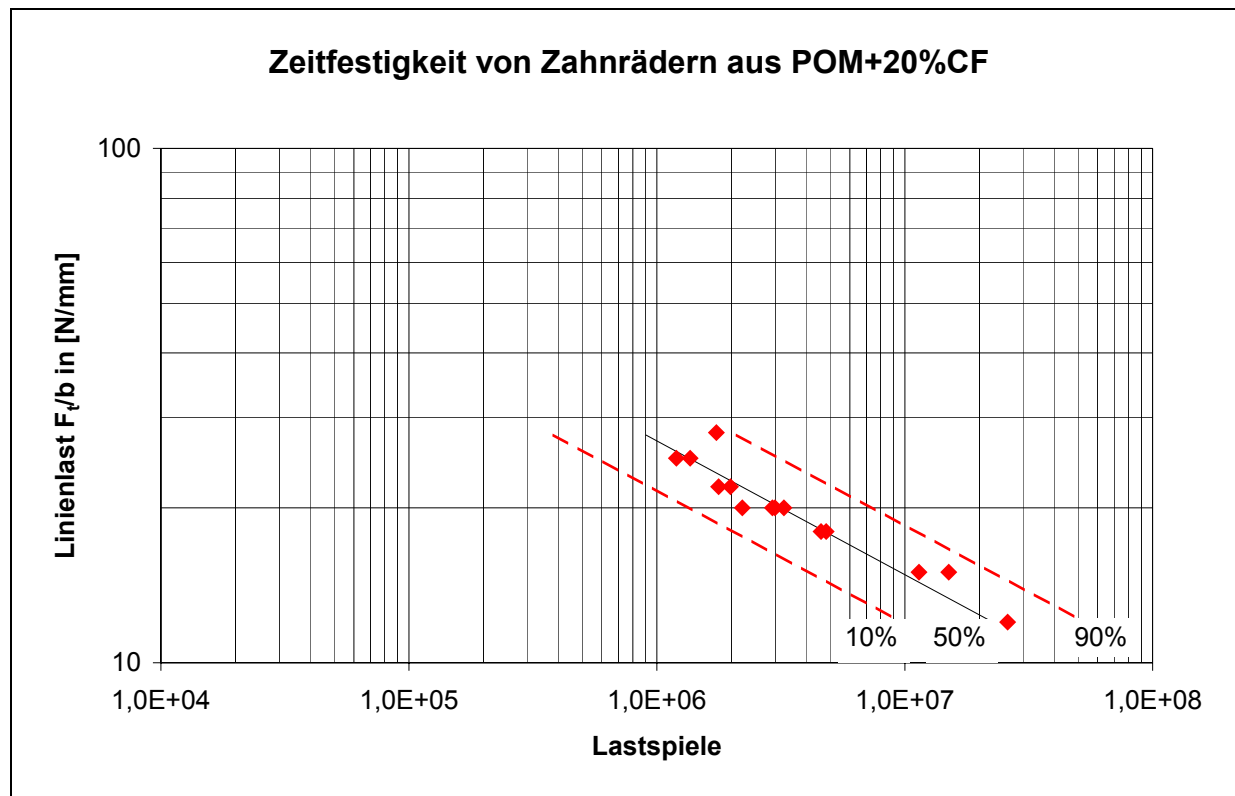


Abb. 42: Zeitfestigkeiten von Kunststoffzahnradern aus POM+20%CF im Trockenlauf, $m = 2$ mm, $v_t = 7,5$ m/s, Kunststoff/Stahl

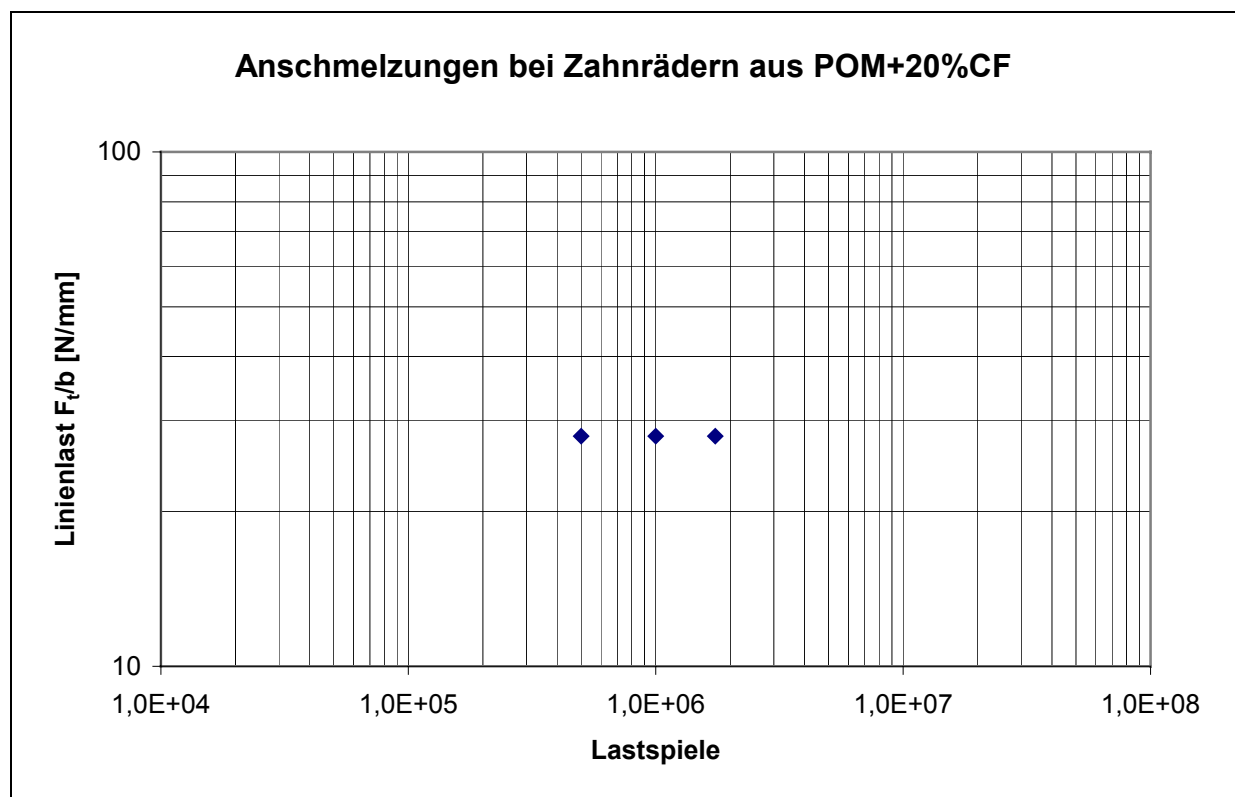


Abb. 43: Anschmelzungen bei Kunststoffzahnradern aus POM+20%CF im Trockenlauf, $m = 2$ mm, $v_t = 7,5$ m/s, Kunststoff/Stahl

PEEK FC30

Versagensursache war in allen untersuchten Lastbereichen ($F_t/b = 10 - 35 \text{ N/mm}$) Zahnfußbruch.

Bei PEEK FC30 traten bis zu einer Linienlast von $F_t/b = 35 \text{ N/mm}$ keine Anschmelzungen auf. Dies liegt an den geringen Reibungskoeffizienten, bedingt durch die reibungsmindernden Zusätze und die hohe Schmelztemperatur dieses Hochtemperaturthermoplastes. Die Zeitfestigkeitswerte sind in Abb. 44 dargestellt.

Es zeigte sich in allen untersuchten Lastbereichen Grübchenbildung, wobei die Grübchen über der gesamten Flanke entstanden.

Durch einen geringeren Faseranteil und damit einem geringeren E-Modul kann wahrscheinlich die Grübchenbildung vermindert werden. Dadurch werden die auftretenden Hertzschen Pressungen verringert.

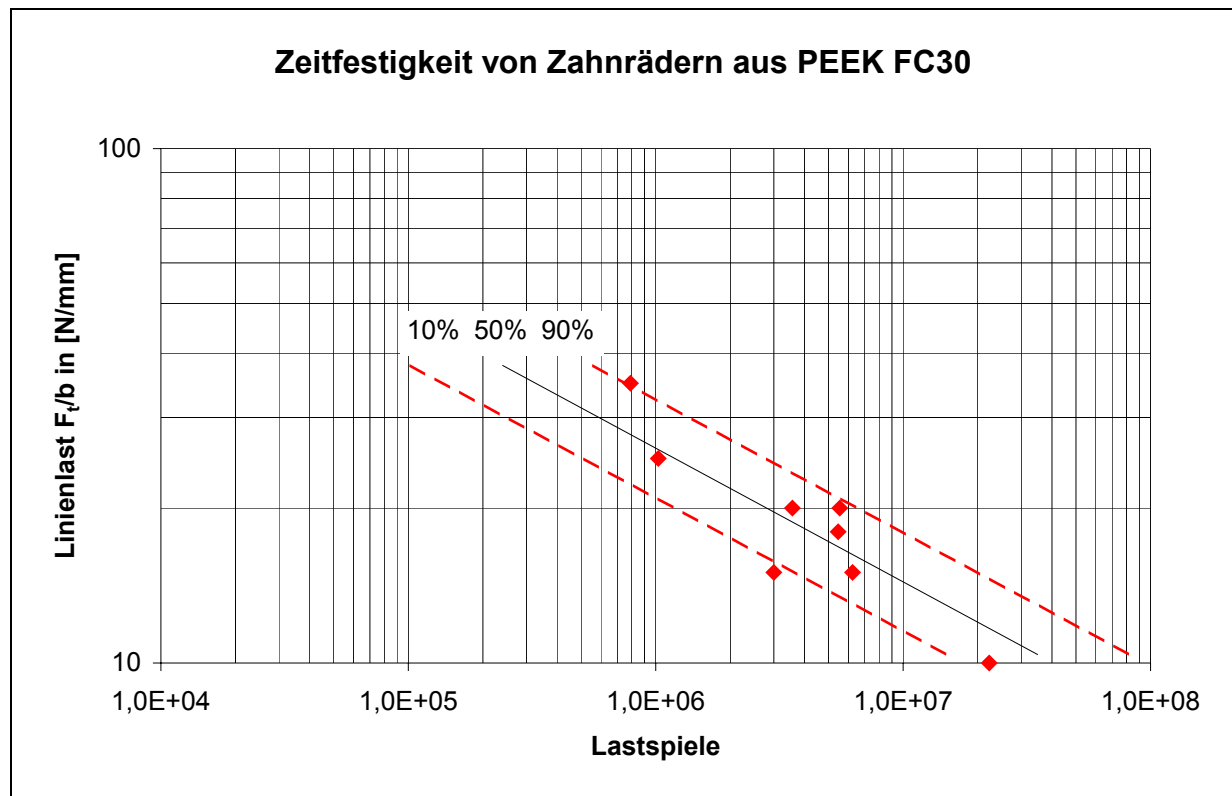


Abb. 44: Zeitfestigkeit von Kunststoffzahnradern aus PEEK FC30 im Trockenlauf, trockenlaufend, $m = 2 \text{ mm}$, $v_t = 7,5 \text{ m/s}$, Kunststoff/Stahl

Polyamid 46

Die Zeitfestigkeitskennwerte der Zahnräder aus PA46 sind Abb. 45 zu entnehmen.

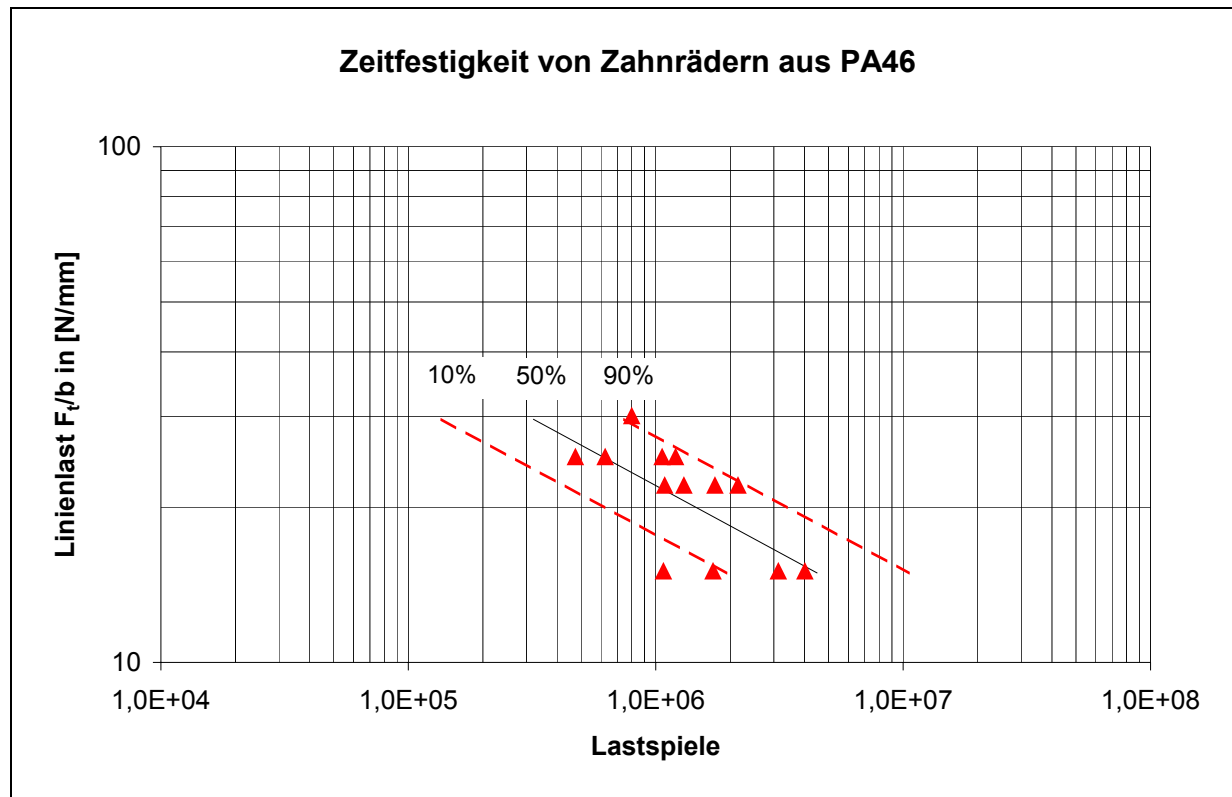


Abb. 45: Zeitfestigkeit von Kunststoffzahnradern aus PA46 im Trockenlauf, Kunststoff/Stahl, $m = 2 \text{ mm}$, $v_t = 7,5 \text{ m/s}$

Die Zahnräder aus PA46 versagten durch Zahnbrüche und Anschmelzungen. Im Gegensatz zu Zahnrädern aus PA66+20%AF traten die Anschmelzungen nicht schon nach wenigen Minuten, sondern erst nach längerer Laufzeit ein. Sie wurden bei allen untersuchten Belastungen beobachtet. Bei geringen Lasten traten sie entsprechend später ein. Meist versagten die Zahnräder gleichzeitig durch Brüche und Anschmelzungen.

Optimierungsmöglichkeiten für PA46 als Zahnradwerkstoff ergeben sich aus der Zugabe von Aramidfasern oder PTFE. Aramidfasern würden den Reibungskoeffizienten etwas senken und die Biegezugfestigkeit erhöhen.

PTFE könnte den Reibungskoeffizienten und damit die Erwärmung des Zahnrades stärker verringern als Aramidfasern. Es würde allerdings zu einer Verschlechterung der mechanischen Eigenschaften (z.B. Zugfestigkeit) kommen.

5.1.6 Vergleich der Zeitfestigkeiten für trockenlaufende Zahnräder

Tabelle 14 zeigt zur besseren Übersicht die Parameter der einzelnen Wöhlerlinien für die jeweiligen Werkstoffe. Die Gleichung zur Bestimmung der erreichbaren Lastspielzahl \bar{N} bei 50% Ausfallwahrscheinlichkeit lautet

$$\bar{N} = N_{20} \cdot \left(\frac{F_t/b}{20 \text{ N/mm}} \right)^{-k} \quad (5 - 8)$$

N_{20} – Bezugslastspielzahl für $F_t/b = 20 \text{ N/mm}$ im trockenlaufenden Betrieb

F_t/b – gewählte Linienlast [N/mm]

k – Neigungsexponent der Wöhlerkennlinie

\bar{N} – Lastspielzahl für die gewählte Linienlast bei 50% Ausfallwahrscheinlichkeit

Werkstoff	Exponent k	Anschmelzlast F_t/b [N/mm]	Bezugslast- spielzahl N_{20} [Lastspiele]	Streu- spanne T_N
PA66+20%AF (s)	3,85	28	$2,944 \cdot 10^7$	1:5,5
PA66+20%AF (g)	3,85	32 [Heym-97]	$0,096 \cdot 10^7$	1:5,5
PA66+15%AF+10%PTFE	3,85	>35	$0,228 \cdot 10^7$	1:5,5
PA66+20%CF	3,85	25	$1,249 \cdot 10^7$	1:5,5
POM+20%CF	3,85	28	$0,316 \cdot 10^7$	1:5,5
POM+10%AF+10%PTFE	3,85	20	$0,316 \cdot 10^7$	1:5,5
PEEK FC30	3,85	>35	$0,281 \cdot 10^7$	1:5,5
PA46	3,85	<35	$0,167 \cdot 10^7$	1:5,5
POM+PTFE [Heym-97]	3,85	>40 [Heym-97]	$0,342 \cdot 10^7$	1:5,5
PA6G [Heym-97]	3,85	>25 [Heym-97]	$0,159 \cdot 10^7$	1:5,5

Tab. 14: Gegenüberstellung der normierten Zeitfestigkeitskennwerte der untersuchten trockenlaufenden Kunststoffzahnäder

Abb. 46 verdeutlicht diese Werte aus Tab. 14 noch einmal grafisch. Anhand dieser Grafik kann leicht für den entsprechenden Einsatzfall ein geeigneter Kunststoff gewählt werden. Wird ein Kunststoffzahnrad mit hoher Lebensdauer benötigt, so wird ein Kunststoff mit hoher Bezugslastspielzahl N_{20} ausgewählt. Dabei ist zu beachten, dass die anliegende Last unterhalb der Anschmelzlast bleibt. So kann beispielsweise für Lasten unter $F_t/b = 28 \text{ N/mm}$ PA66+20%AF als geeigneter Werkstoff ausgewählt werden.

Für Kunststoffzahnäder, die nur geringe Lastspielzahlen, aber dafür hohe Lasten ohne Anschmelzungen ertragen sollen, sollte ein Kunststoff mit hoher Anschmelzlast ausgewählt werden. Dafür wären z.B. PA66+15%AF+10%PTFE oder PEEK FC30 geeignet. Bei beiden liegt die Anschmelzlast über $F_t/b = 35 \text{ N/mm}$.

Somit kann anhand dieses Diagramms eine erste grobe Vorauswahl getroffen werden. Anschließend kann anhand der Lastspielzahlformel die Tragfähigkeit abgeschätzt werden.

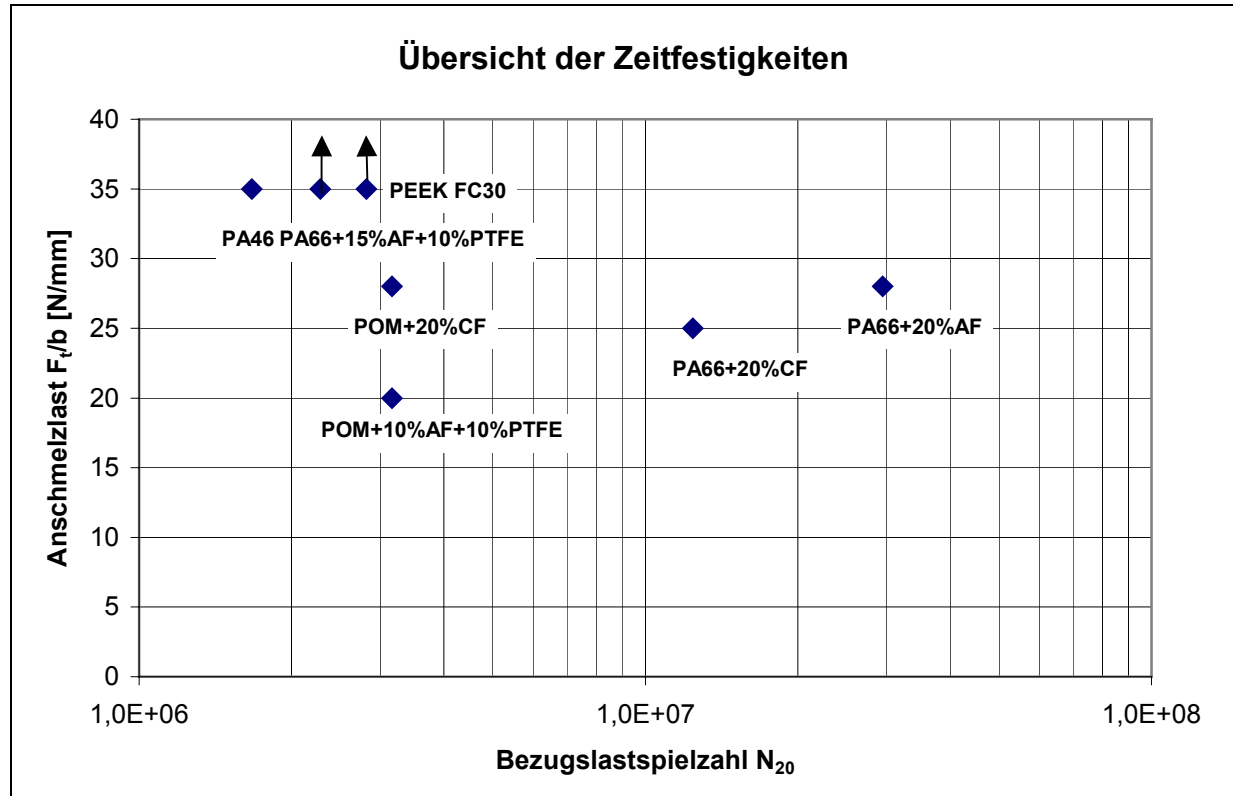


Abb. 46: Gegenüberstellung der Bezugslastspielzahlen und Anschmelzlasten der untersuchten trockenlaufenden Kunststoffzahnräder (↑ bis zu der Last wurden keine Anschmelzungen festgestellt)

5.2 Zahnmasse­temperatur

Erreichen des Beharrungszustandes ist von der Last abhängig. Bei hohen Lasten wurde der quasistationäre Zustand aufgrund der größeren Wärmeeinbringung eher als bei geringen Lasten erreicht.

Weiterhin zeigte sich im Stahlzahnrad eine durchschnittlich um 15 – 20 K höhere mittlere Zahnmasse­temperatur gegenüber dem Kunststoffzahnrad. Dies wurde bereits von SIEDKE [Sied-77], BAUMGART [Baum-92] und von HEYM [Heym-97] festgestellt. SIEDKE [Sied-77] erklärt dies mit der schlechteren Wärmeleitfähigkeit der Kunststoffe gegenüber dem Stahl. Bei den Kunststoffzahn­rädern wird die Wärme überwiegend durch Konvektion abgeführt. Wegen der geringeren Wärmeleitung des Kunststoffes ist die Temperatur an der Messstelle geringer als im Stahlzahnrad. Zusätzlich ist, bei der hier untersuchten Zahnradpaarung, jeder einzelne Zahn im Stahlzahnrad aufgrund geringeren Zähneanzahl öfter im Eingriff als jeder einzelne Kunststoffzahn. Somit wird ihm häufiger Wärme zugeführt.

Aus Abb. 47 wird die Wirksamkeit der tribologischen Optimierung verdeutlicht. Alle gefüllten Polyamide weisen geringere mittlere Zahntemperaturen als das ungefüllte Polyamid auf.

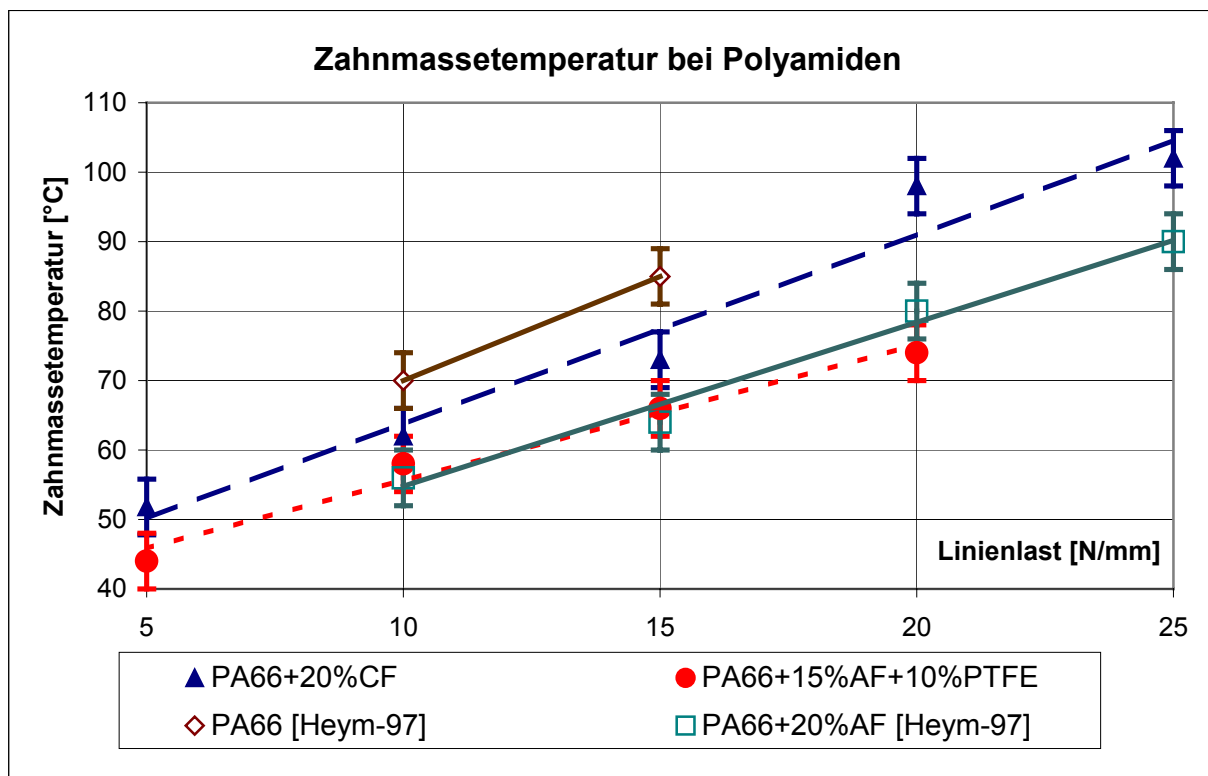


Abb. 47: Vergleich der Zahnmasse­temperaturen an trockenlaufenden Kunststoffzahn­rädern aus PA66, Paarung Kunststoff/Stahl, $m = 2 \text{ mm}$, $v_t = 7,5 \text{ m/s}$

Bei den Zahnrädern aus POM zeigten sich durch die gewählten Füll- und Verstärkungsstoffe keine Verbesserungen bei den Zahnmasse-temperaturen. Diese Ergebnisse korrelieren mit den Ergebnissen der Wirkungsgradmessungen (Abb. 49). Auch dort zeigten sich keine Verbesserungen. Eine genauere Erklärung bieten möglicherweise die Verläufe der Reibungskoeffizienten über der Temperatur bei diesen Kunststoffen.

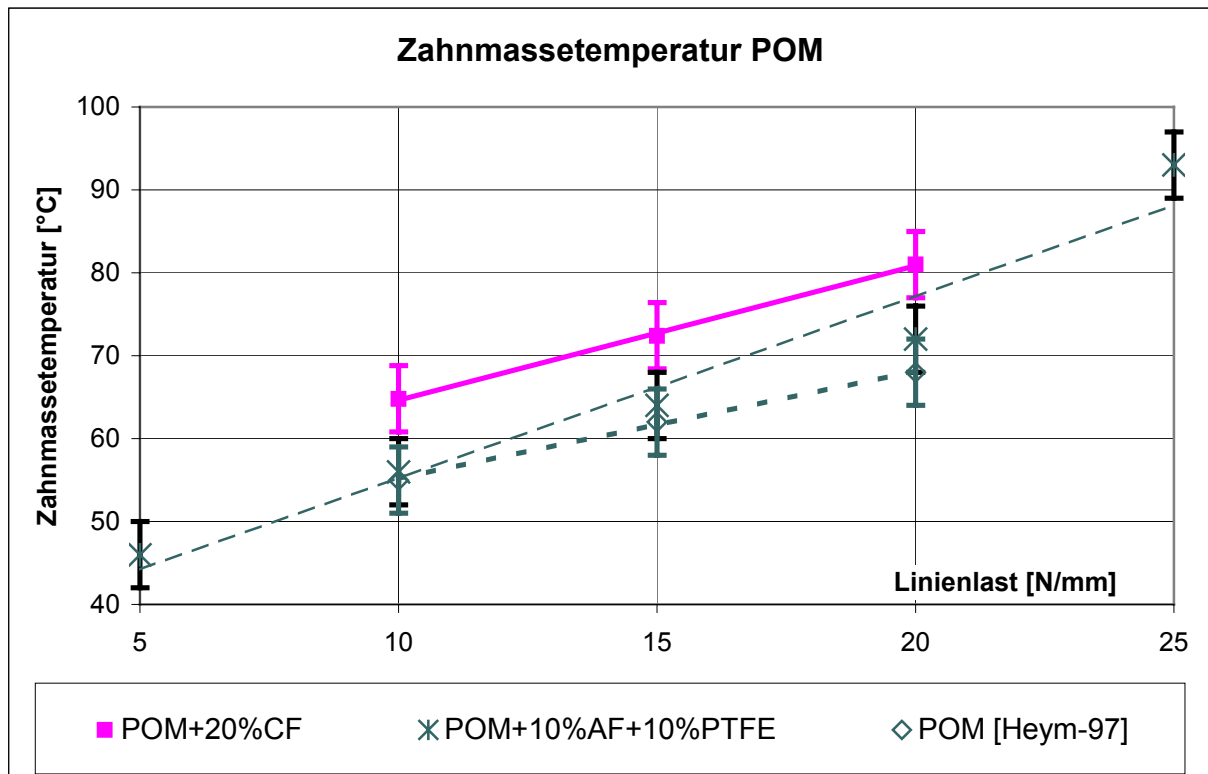


Abb. 48: Vergleich der Zahnmasse-temperaturen an trockenlaufenden Kunststoffzahn- rädern aus POM, Paarung Kunststoff/Stahl, $m = 2 \text{ mm}$, $v_t = 7,5 \text{ m/s}$

5.3 Wirkungsgradmessungen

Abb. 49 zeigt die ermittelten Wirkungsgrade mit den dazugehörigen absoluten Minima und Maxima.

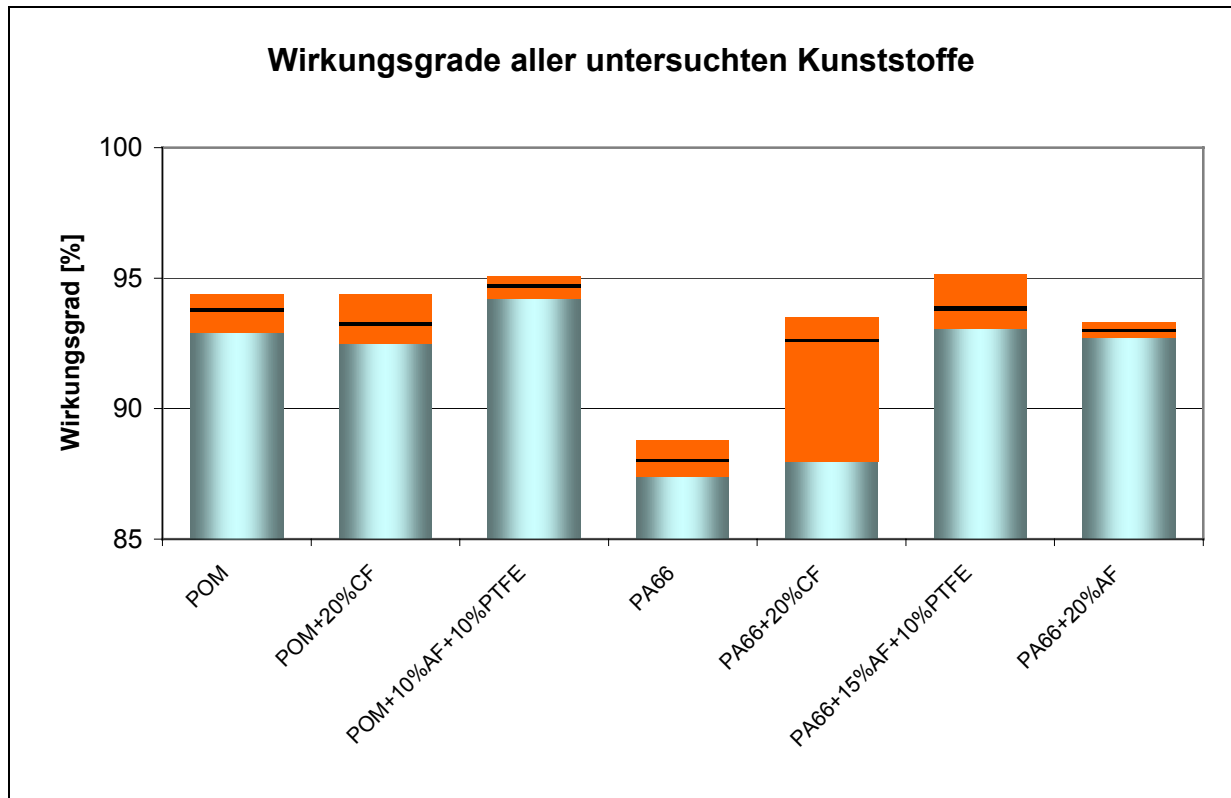


Abb. 49: Wirkungsgrade der untersuchten Kunststoffzahnräder, Paarung Kunststoff/Stahl, trockenlaufend, $v_t = 7,5 \text{ m/s}$, $F_t/b = 20 \text{ N/mm}$

Da der Wirkungsgrad bei einigen Kunststoffzahnradern spontan stark abfallen kann, wurde zusätzlich noch der zeitliche Mittelwert des Wirkungsgrades der Werkstoffpaarung dargestellt. Besonders für PA66+20%CF ist dies notwendig, hier kann offensichtlich der Wirkungsgrad kurzzeitig bis zum Wirkungsgrad des Grundwerkstoffes (PA66) abfallen. Mögliche Ursache könnte ein verschleißbedingtes Ausbrechen von Fasern und damit ein kurzzeitiges Überwiegen des Grundwerkstoffes an der Zahnflankenoberfläche sein. Es herrschen dann die gleichen Gleitreibungsverhältnisse (und damit Wirkungsgrade) wie an dem Zahnrad aus PA66 bis die nächsten Kohlenstofffasern wieder durch Verschleiß an die Oberfläche geraten.

Bei den Wirkungsgradmessungen und einer Linienlast von 20 N/mm zeigten sich Wirkungsgradverbesserungen bei PA66 ($\eta = 87,5 - 89\%$) durch die Zugabe der

gewählten Fasern und Trockenschmierstoffe, gegenüber dem ungefüllten POM ($\eta = 93 - 94,5\%$).

Die Zugabe von 20% Kohlenstofffasern bewirkt eine Erhöhung des Wirkungsgrades auf $\eta = 91 - 94\%$ (kurzzeitig $\eta = 88\%$). Durch Aramidfaserverstärkung erhöht sich der Wirkungsgrad von PA66 auf zirka $\eta = 92 - 93,5\%$. Durch die Zugabe von PTFE zu dem PA66+AF verbessert sich der Wirkungsgrad nur geringfügig auf $\eta = 93-95\%$. Allerdings erreicht er gegenüber PA66+20%AF schon nach wenigen Minuten diesen Wert.

Bei POM konnte keine Verbesserung des Wirkungsgrades durch die Faserzugabe festgestellt werden. Er lag bereits für POM bei $\eta = 93 - 94,5\%$. Für POM+20%CF wurde $\eta = 92,5 - 94\%$ und für POM+10%AF+10%PTFE $\eta = 94 - 95\%$ bestimmt.

Um diese Ergebnisse genauer interpretieren zu können, sind Messungen des Reibungskoeffizienten bei den erhöhten Gleitflächentemperaturen erforderlich, wie sie an den Zahnradflanken auftreten. Diese sollen in einem Folgeprojekt durchgeführt werden.

5.4 Geräuschpegel

Bei den Geräuschmessungen handelt es sich um relative Messungen, weshalb die Ergebnisse nur untereinander verglichen werden sollten. Die Werte zeigen lediglich die Tendenzen der Geräuschentwicklung bei den untersuchten Kunststoffzahnradern auf. Absolute Messungen sind unter den gegebenen räumlichen Laborverhältnissen nicht möglich.

Einfluss der Belastung und Lastspielzahl

Aus Abb. 50 ist zu erkennen, dass der maximale Geräuschpegel nicht immer mit der Belastung steigt. So ist bei einer Belastung von $F_t/b = 15 \text{ N/mm}$ der maximale Geräuschpegel höher als bei $F_t/b = 20 \text{ N/mm}$.

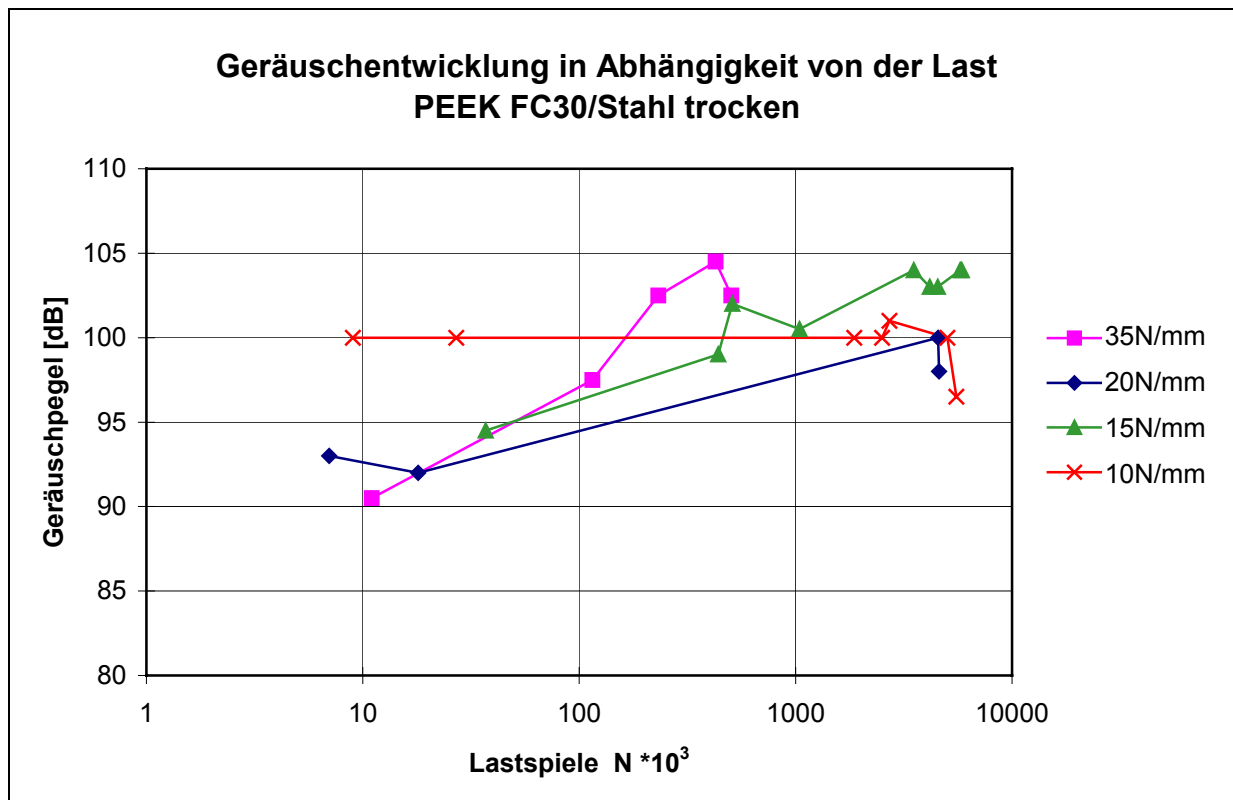


Abb. 50: Einfluss der Belastung auf die Geräuschentwicklung, $n = 2310 \text{ min}^{-1}$, $m = 2 \text{ mm}$, trockenlaufend

Bei geringer Last ($F_t/b = 10 \text{ N/mm}$) ist der Geräuschpegel lange Zeit konstant. Eine mögliche Erklärung ist, dass es aufgrund der geringen Last zu geringerem Verschleiß und damit zu weniger geräuschverursachenden Verzahnungsfehlern kommt.

Bei höheren Belastungen nimmt der Geräuschpegel von Anfang bis zum Bruch zu. Bemerkt sei an dieser Stelle, dass mit etwas Übung bei der Paarung Kunststoff/Stahl

ein bevorstehender Zahnbruch akustisch anhand der veränderten Geräusche relativ genau vorhergesagt werden kann. Wie aus Abb. 50 und Abb. 52 zu sehen ist, verändert sich vor dem Zahnbruch der Geräuschpegel deutlich. Er erhöht sich um anschließend wieder abzufallen, die Schädigung ist bereits eingetreten. Kurz vor dem Bruch steigt der Pegel manchmal noch einmal an. Auch bei Zahnfußbrüchen ist von einer Art akustischer Schadensankündigung auszugehen. Diese ist so deutlich, dass hier ebenfalls allein vom Gehör her mit etwas Erfahrung der Versagenszeitpunkt abgeschätzt werden kann.

Geräuschpegel in Abhängigkeit von der Drehzahl

Bei spritzgegossenem PEEK FC30 gepaart mit einem Stahlzahnrad wurde der Geräuschpegel in Abhängigkeit von der Drehzahl bei konstanter Linienlast ($F_t/b = 25$ N/mm) ermittelt. Es zeigte sich eine zu erwartende Steigerung des Geräuschpegels über der Drehzahl. Die Steigerung des Geräuschpegels von 0 bis 2300/min beträgt rund 35 dB (Abb. 51). Diese verläuft asymptotisch. Anhand dieses Verlaufes ist zu erkennen, ob eine Drehzahlreduzierung zu einer deutlichen Geräuschverbesserung führt oder nicht. So ist z.B. eine Reduzierung von 1500 min^{-1} auf 1000 min^{-1} weitaus effektiver als von 2300 min^{-1} auf 1800 min^{-1} .

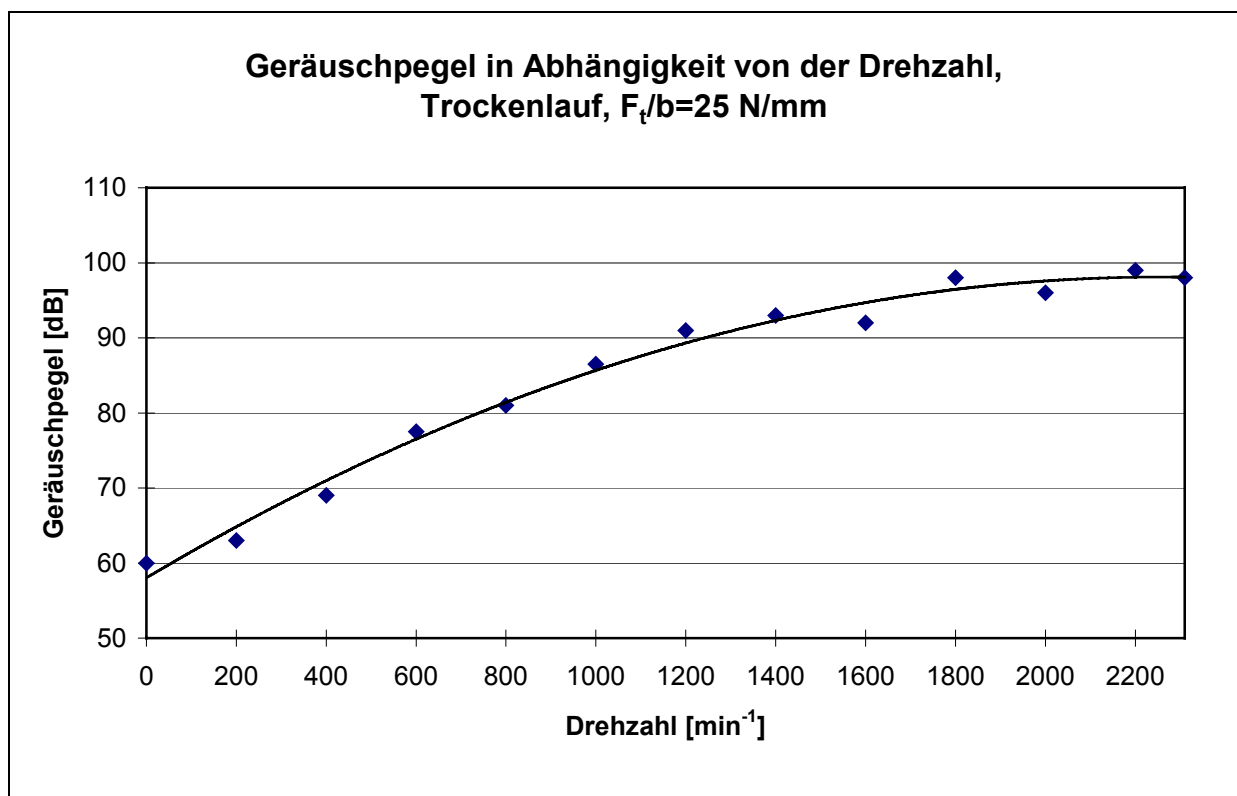


Abb. 51: Einfluss der Drehzahl auf die Geräuschentwicklung bei trockenlaufenden Kunststoffzahnradern, PEEK FC30/Stahl

Einfluss der Lastspielzahl

Aus Abb. 52 ist erkennbar, dass der Geräuschpegel bei der Paarung PA66+20%AF/Stahl mit einer Linienlast von $F_t/b = 25 \text{ N/mm}$ vom Anfang bis zum Versagen der Zahnräder um rund 20 dB ansteigt. Auch bei dieser Paarung zeigte sich eine akustische Schadensankündigung im Geräuschpegelverlauf. Zu beachten ist hierbei, dass der Verlauf lastabhängig ist (siehe Abb. 50).

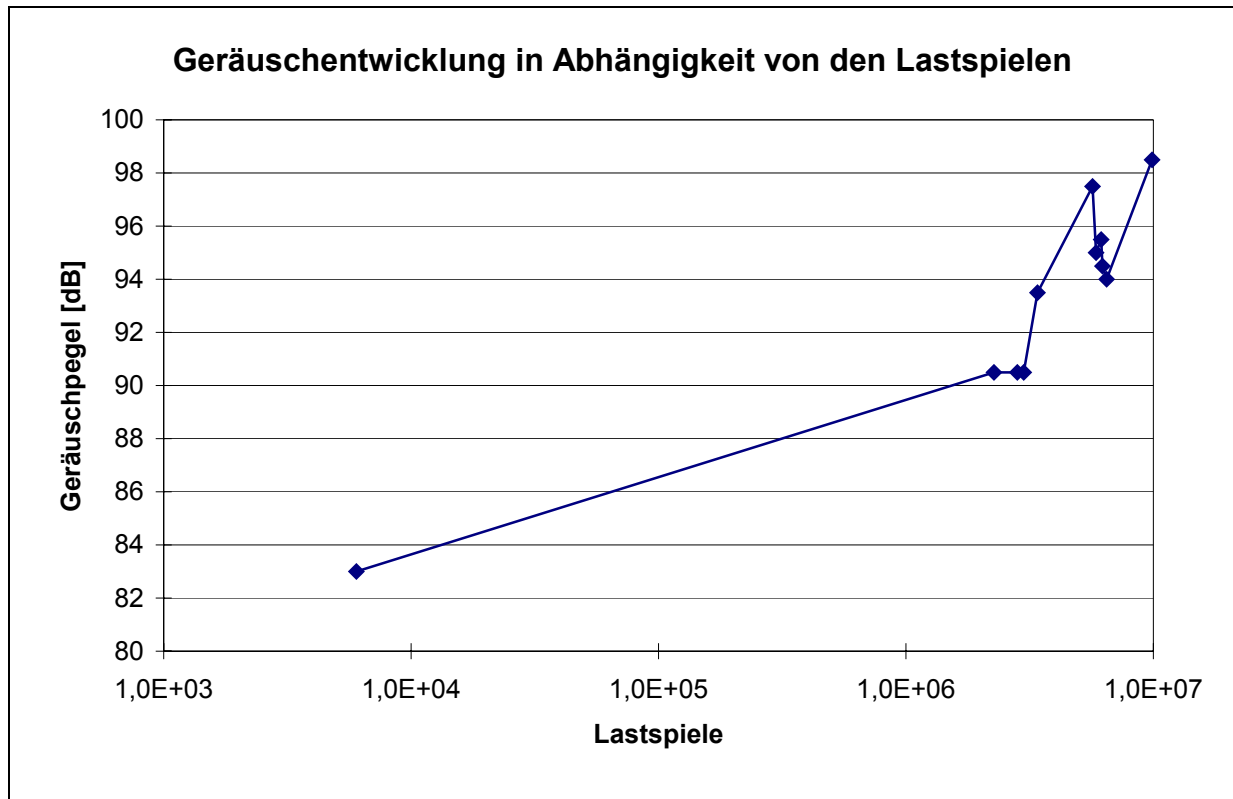


Abb. 52: Geräuscentwicklung bei der Paarung PA66+20%AF/Stahl, trockenlaufend $F_t/b = 25 \text{ N/mm}$

5.5 Verschleiß und Kriechverformung

Ziel dieses Abschnitts ist es die Auswirkungen der verschiedenen Füll- und Verstärkungsstoffe auf Verschleiß und Kriechverformung darzustellen. Diese Messungen wurden nur an den trockenlaufenden Zahnrädern durchgeführt. Für die ölgeschmierten Zahnräder sollen die Verschleiß- und Kriechverformungsmessungen in einem Folgeprojekt durchgeführt werden.

Bei den Verschleißkurven sind die unterschiedlichen Verzahnungsqualitäten zu beachten. So zeigten die spritzgegossenen Zahnräder einen größeren Profilwinkelfehler als die gefrästen Zahnräder. Durch die verschiedenen Ausgangsflankenformen relativiert sich die Aussagekraft der Messergebnisse. Die Herstellung von Proben mit gleicher Ausgangsflankenform war (wie in Kap. 3.4 erläutert) aus Kostengründen nicht möglich. Somit geben die Ergebnisse lediglich einen relativen Vergleich der einzelnen Kunststoffe untereinander.

Der Verschleiß wird durch das Vermessen der Eingriffsflanke vor und nach dem Lauf unter Berücksichtigung der Kriechverformung bestimmt. Aus den folgenden Diagrammen ergibt sich der Verschleiß durch den Vergleich der jeweiligen Profilform vor und nach dem Lauf, die Kriechverformung durch den Vergleich der Profilform der nicht im Eingriff stehenden Rückenflanke vor und nach dem Lauf und der Absolutverschleiß aus dem Vergleich der Profilform vor und nach dem Lauf unter Berücksichtigung der Kriechverformung.

Die Prüflinge wurden alle bei einer Linienlast von $F_t/b = 20 \text{ N/mm}$ und nach gleicher Lastspielzahl $N = 1,5 \cdot 10^6$ vermessen. Somit ist ein direkter Vergleich der Kriech- und Verschleißkurven möglich. Linienlast und Lastspielzahl wurden so gewählt, dass alle untersuchten Kunststoffzahnäder nicht vor $N = 1,5 \cdot 10^6$ Lastspielen versagen, gleichzeitig aber ein deutlicher Verschleißbetrag messbar ist.

Aus Gründen der Übersichtlichkeit wurden in den Diagrammen exemplarisch jeweils nur die Änderungen für einen Zahn dargestellt. Für die Kriechverformung wird die unverformte Ausgangsrückflanke, die selbe nach dem Versuch verformte Rückflanke und der sich aus der Differenz der beiden ergebende Wert der Kriechverformung dargestellt. Der Verschleiß wird mit dem Verlauf der Ausgangsflanke, der verschlissenen Flanke und dem sich ergebenden Absolutverschleiß dargestellt.

PA66

Die Zahnräder aus PA66 weisen im Zahnkopf eine Kriechverformung von 0,05 mm bis 0,08 mm auf (Abb. 53).

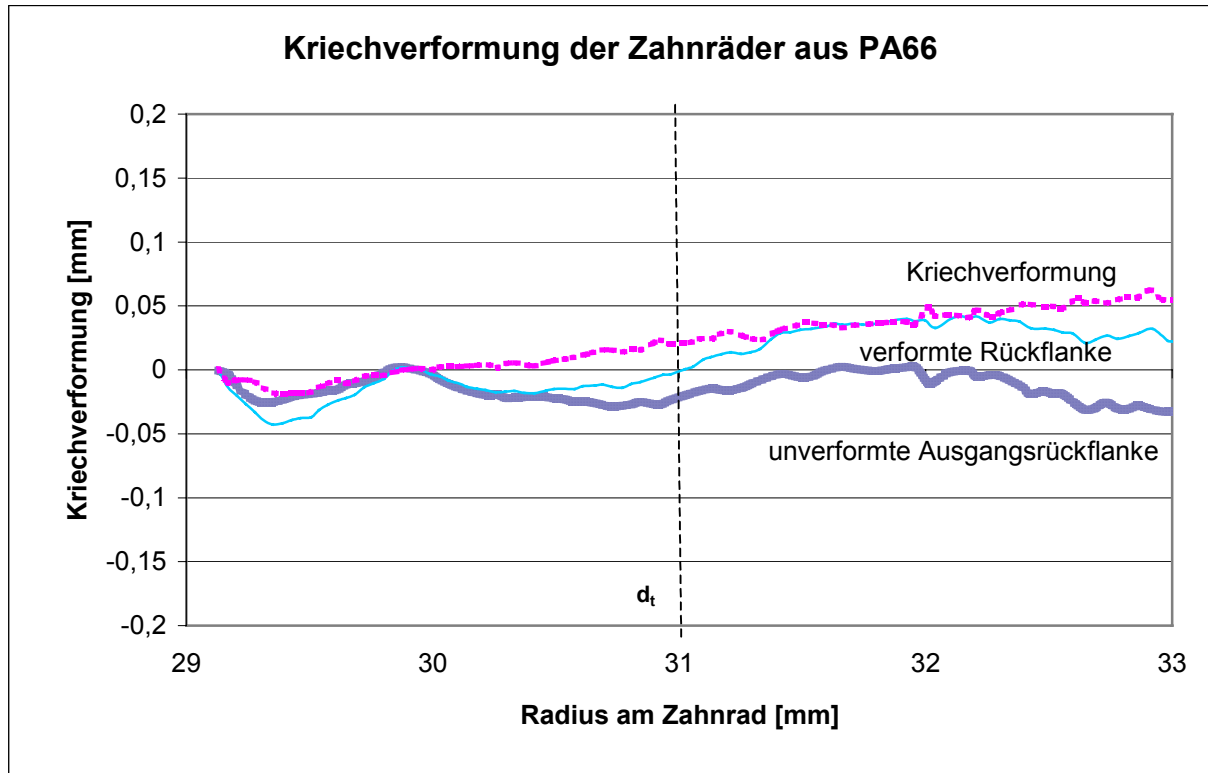


Abb. 53: Kriechverformung beispielhaft an einem Zahn, PA66/Stahl, trockenlaufend, $F_t/b = 20 \text{ N/mm}$, $N = 1,5 \cdot 10^6$ Lastspiele

Unter Berücksichtigung der Kriechverformung ergibt sich aus der Verschleißkurve Abb. 54 ein Absolutverschleiß von zirka 0,1 mm im Zahnkopf und 0,10 – 0,14 mm in Teilkreisnähe d_t (Abb. 54). Wie schon in [Heym-97] festgestellt, ist der Verschleiß höher als bei dem anderen Standardzahnradkunststoff POM (Abb. 62). PA66 ist dem POM in der Verschleißfestigkeit im trockenlaufenden Betrieb deutlich unterlegen.

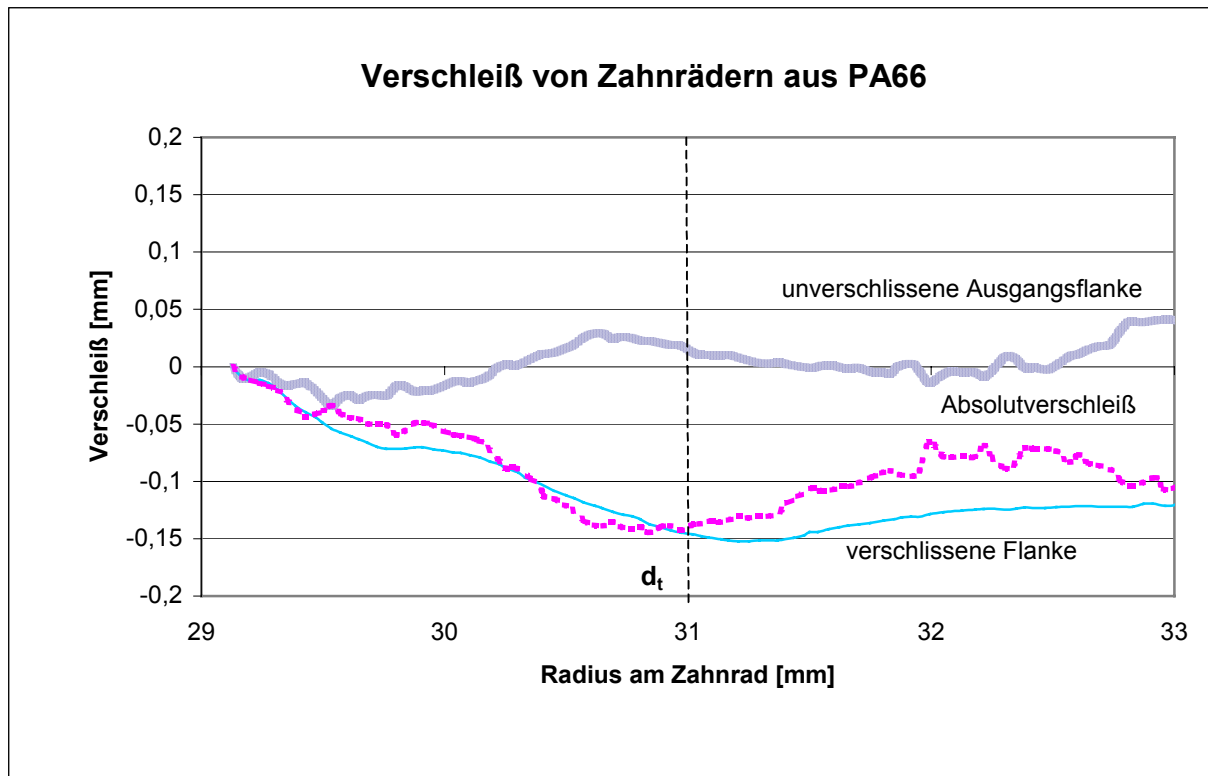


Abb. 54: Verschleißform beispielhaft an einem Zahn PA66/Stahl, trockenlaufend, $F_t/b = 20 \text{ N/mm}$, $N = 1,5 \cdot 10^6$ Lastspiele

PA66+20%AF

Durch die zusätzlichen Aramidfasern ist gegenüber dem Grundwerkstoff PA66 sowohl eine Reduzierung des Verschleißes als auch der Kriechverformung zu erwarten. Die Auswirkung der Faserorientierung bei den gefrästen und gespritzten Zahnrädern auf den Verschleiß wurde bereits von HEYM [Heym-97] betrachtet. Dabei zeigte sich, aufgrund der parallelen Faserorientierung zu den Flanken, ein geringerer Verschleiß bei den spritzgegossenen Zahnrädern aus PA66+20%AF gegenüber den gefrästen Zahnrädern aus PA66+20%AF.

Die maximale Kriechverformung bei PA66+20%AF liegt bei 0,02 mm bis 0,04 mm im Zahnkopf (Abb. 55). Diese ist, wie erwartet, geringer als bei den ungefüllten PA66 (Abb. 53).

Aus der Verschleißkurve (Abb. 56) zeigt sich, dass der Profilwinkelfehler durch den Verschleiß weggeschliffen wird. Die Flankenform nähert sich der Evolventenform an. Somit ist davon auszugehen, dass es bei einer besseren Zahnausgangsform zu geringerem Verschleiß kommt.

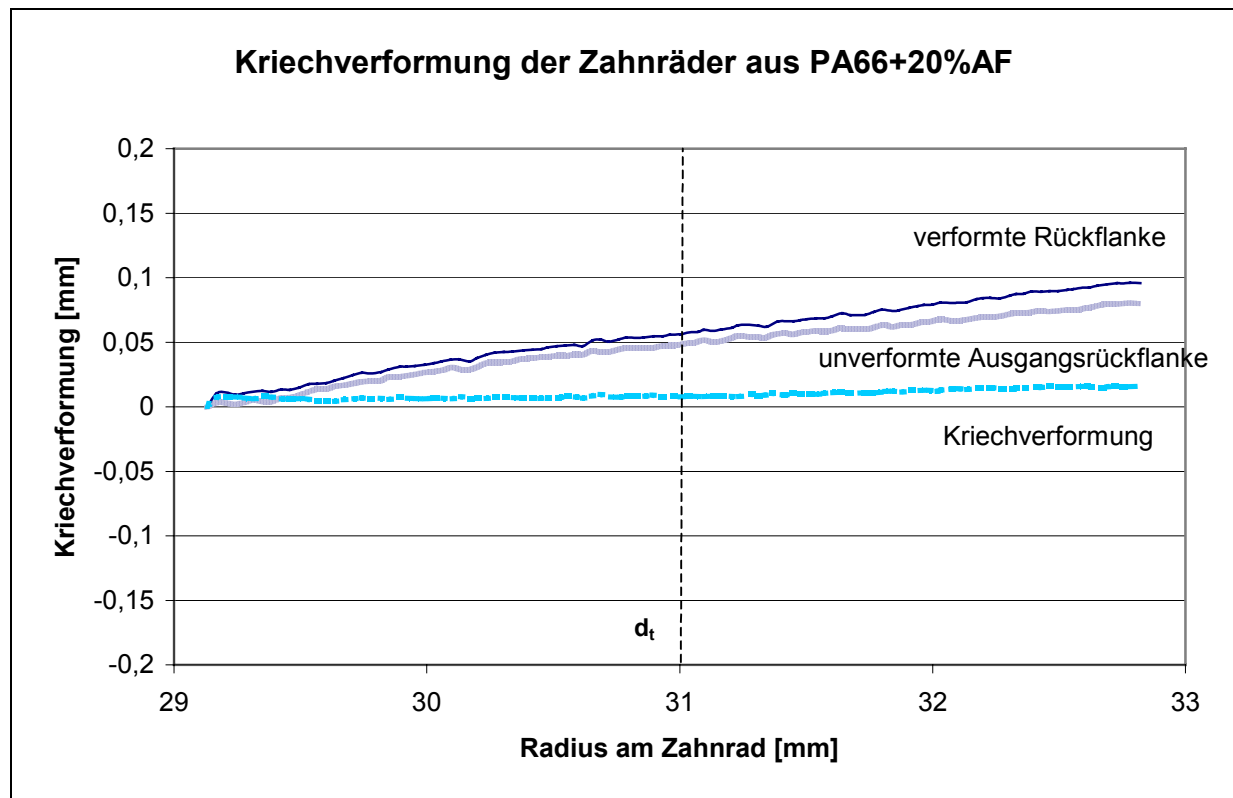


Abb. 55: Kriechverformung beispielhaft an einem Zahn, PA66+20%AF/Stahl, trockenlaufend, $F_t/b = 20 \text{ N/mm}$, $N = 1,5 \cdot 10^6$ Lastspiele

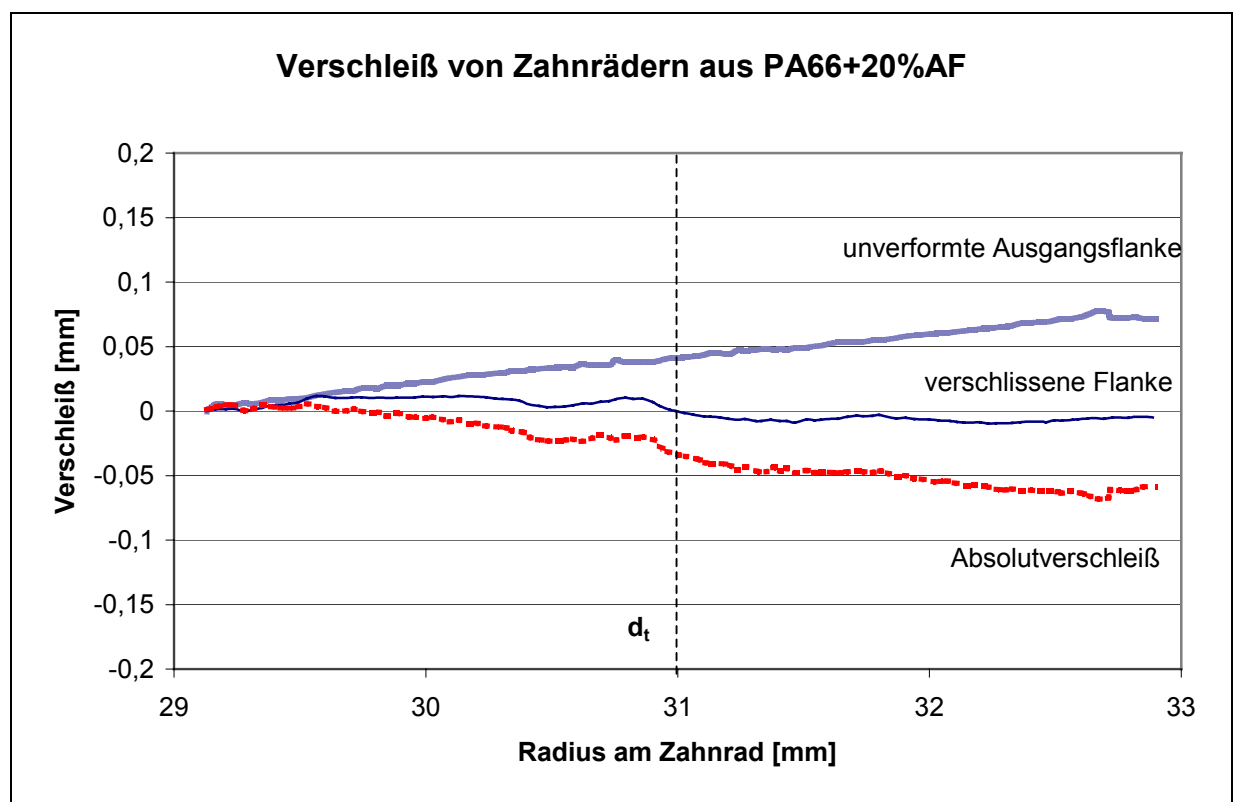


Abb. 56: Verschleißform beispielhaft an einem Zahn, PA66+20%AF/Stahl, trockenlaufend, $F_t/b = 20 \text{ N/mm}$, $N = 1,5 \cdot 10^6$ Lastspiele

Als Absolutverschleiß ergibt sich im Zahnkopf 0,03 bis 0,07 mm (Abb. 56). Somit bestätigt sich auch hier, dass die Aramidfasern zu einer Reduzierung des Verschleißes führen.

PA66+15%AF+10%PTFE

Durch die Zugabe von PTFE ist gegenüber dem PA66 mit Aramidfasern mit einem geringeren Verschleiß zu rechnen. Für die Höhe der Kriechverformung spielen zwei gegenläufige Faktoren eine Rolle. Einerseits müsste sich wegen des geringeren Faseranteils die Kriechverformung erhöhen, andererseits führt die geringere Zahntemperatur (Kap. 5.2) zu einer Reduzierung der Kriechneigung.

Im Zahnkopf zeigte sich eine Kriechverformung von 0,02 mm bis 0,03 mm (Abb. 57). Die Kriechverformung ist damit ähnlich wie bei PA66+20%AF. Es scheint so, als ob eine geringere Fasermenge durch Zugabe von PTFE ausgeglichen werden kann.

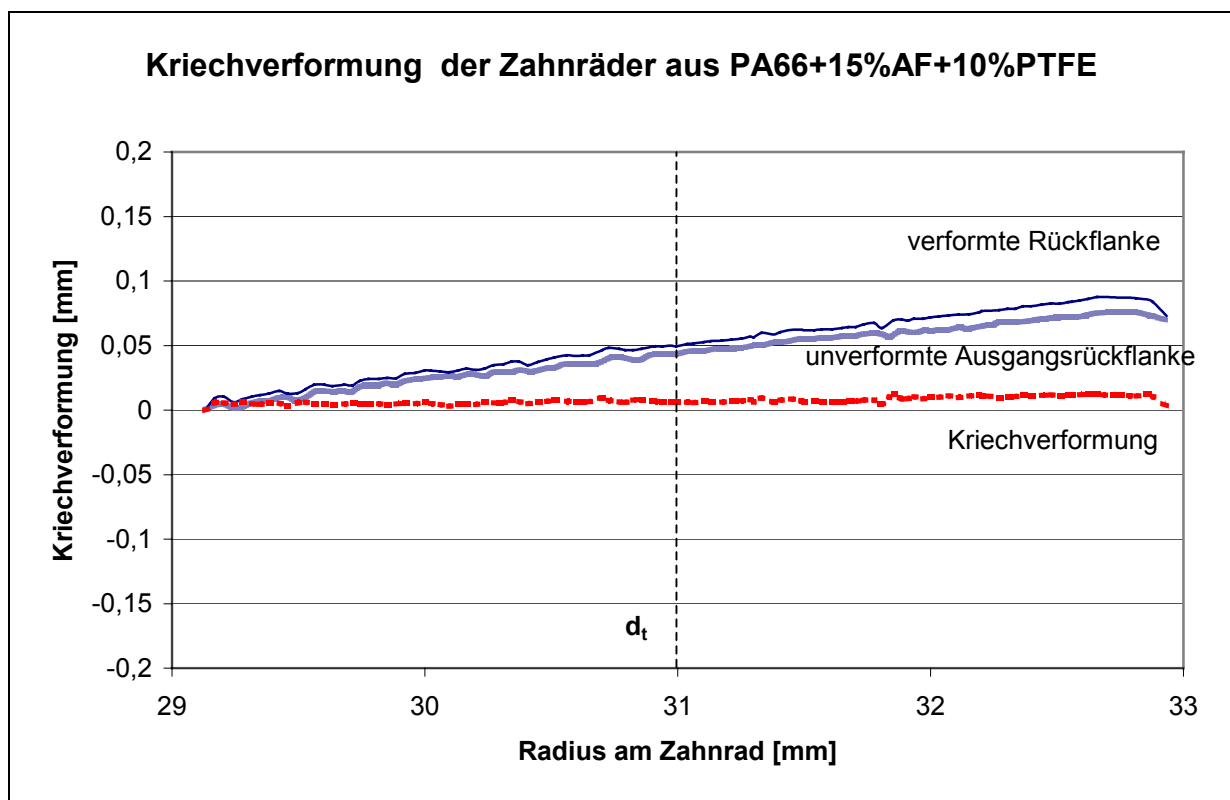


Abb. 57: Kriechverformung beispielhaft an einem Zahn, PA66+15%AF+10%PTFE/Stahl, trockenlaufend, $F_t/b = 20 \text{ N/mm}$, $N = 1,5 \cdot 10^6$ Lastspiele

Der Verlauf der Verschleißkurven (Abb. 58) zeigt, dass es besonders außen ab dem Teilkreisdurchmesser durch den Verschleiß zu einer Annäherung an die Evolvente kommt. Für ein genaueres Bild über den Verschleißverlauf müssten

Verschleißkurven bei viel höherer Lastspielzahl gefahren werden. Da die Zahnräder bei viel höheren Lastspielzahlen aber durch Zahnfußbruch versagen, ist eine Verschleißmessung dann nicht mehr möglich.

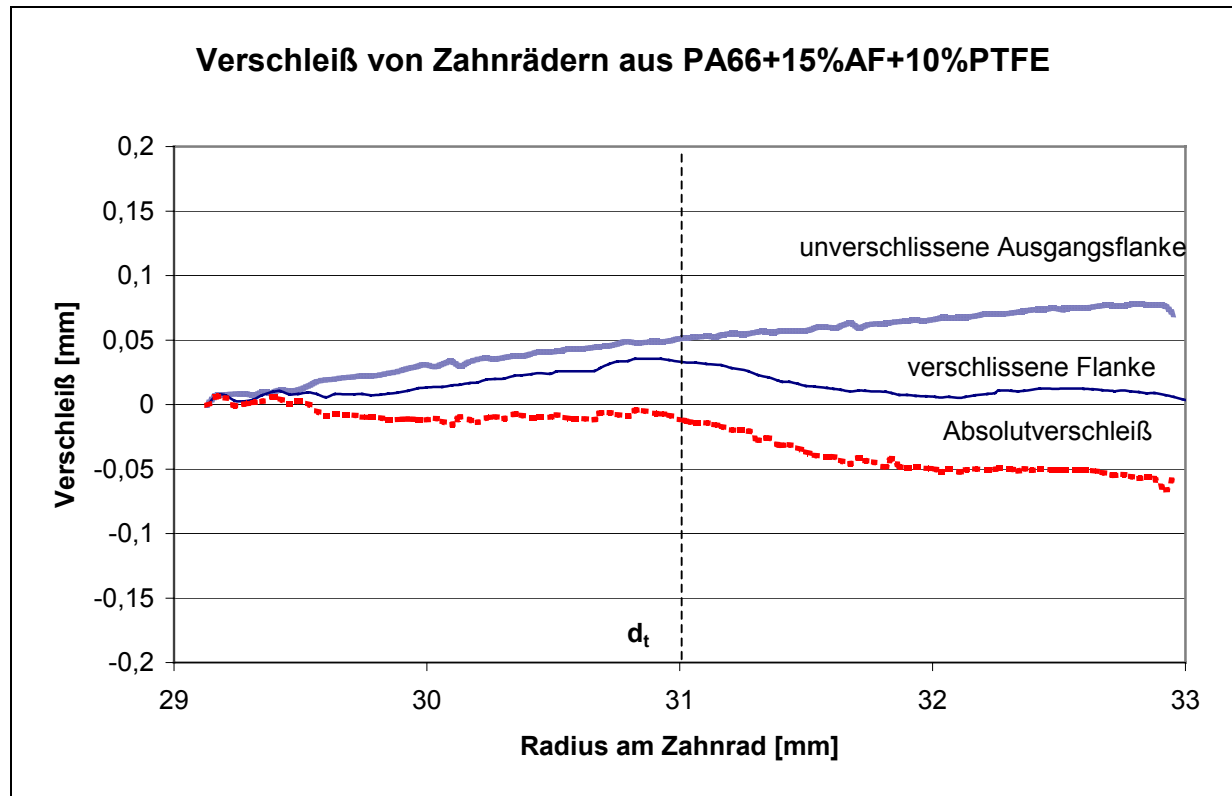


Abb. 58: Verschleißform beispielhaft an einem Zahn, PA66+15%AF+10%PTFE/Stahl, trockenlaufend, $F_t/b = 20 \text{ N/mm}$, $N = 1,5 \cdot 10^6$ Lastspiele

Unter Berücksichtigung der Kriechverformung ergibt sich ein Verschleiß bei PA66+15%AF+10%PTFE von zirka 0,03 bis 0,1 mm im Zahnkopf (Abb. 58).

PA66+20%CF

Durch die zusätzlichen Kohlenstofffasern sind sowohl eine Verschleiß- als auch eine Kriechverformungsreduzierung gegenüber dem unmodifizierten Grundwerkstoff zu erwarten.

Die Zahnräder aus PA66+20%CF weisen aufgrund der Faserverstärkung eine geringe Kriechneigung von 0,01 bis 0,02 mm auf (Abb. 59). Diese ist deutlich geringer als bei dem unverstärkten PA66 (Abb. 53). Sie ist auch etwas geringer als bei PA66+20% Aramidfaser.

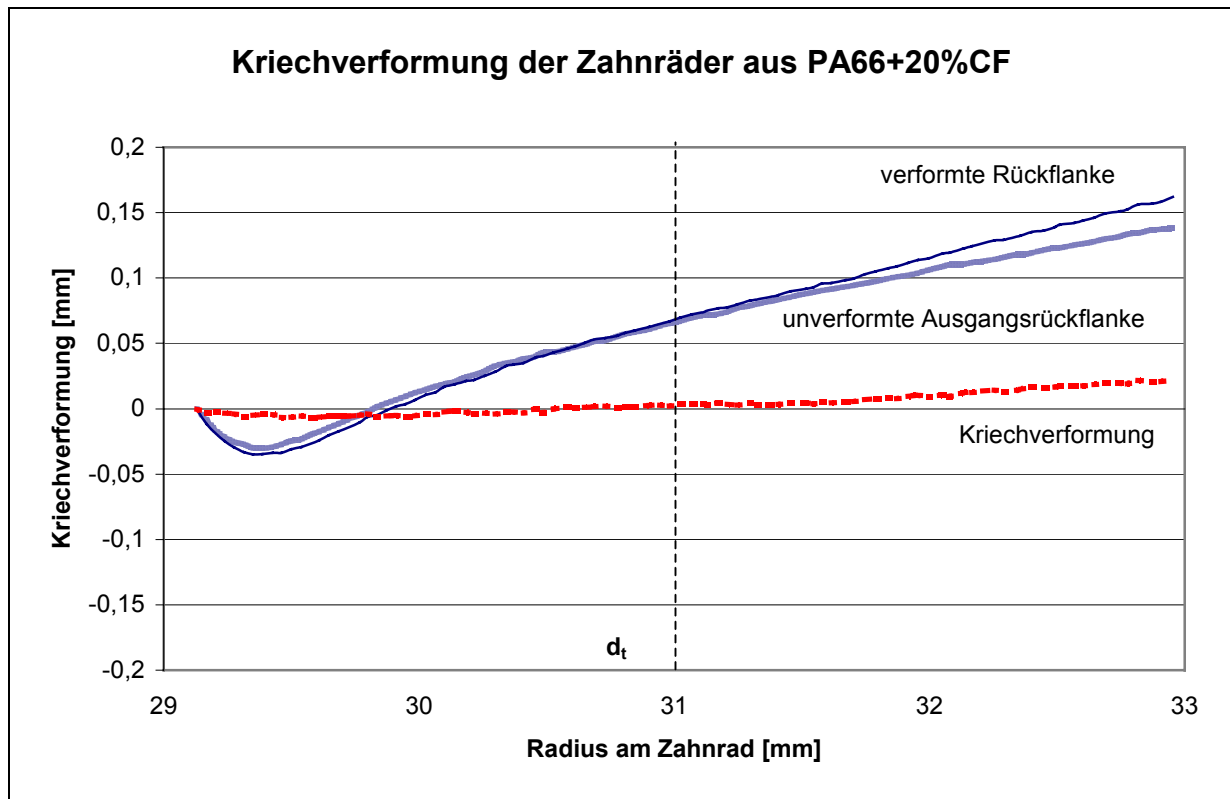


Abb. 59: Kriechverformung beispielhaft an einem Zahn, PA66+20%CF/Stahl, trockenlaufend, $F_t/b = 20 \text{ N/mm}$, $N = 1,5 \cdot 10^6$ Lastspiele

Auch bei diesen faserverstärkten spritzgegossenen Zahnrädern wird der Profilwinkelfehler durch den Verschleiß reduziert und die Flanke nähert sich der Evolventenform an (Abb. 60). Unter Berücksichtigung der sehr geringen Kriechverformung ergibt sich bei PA66+20%CF ein Verschleißbetrag von 0,13 - 0,16 mm im Zahnkopfbereich, von zirka 0,02 mm bis 0,04 mm im Zahnfußbereich und im Teilkreisbereich von ca. 0,05 mm – 0,08 mm (Abb. 60). Durch die Faserverstärkung kommt es zu einer deutlichen Erhöhung des E-Moduls und damit zu einer geringen Grübchenbildung in Teilkreisnähe.

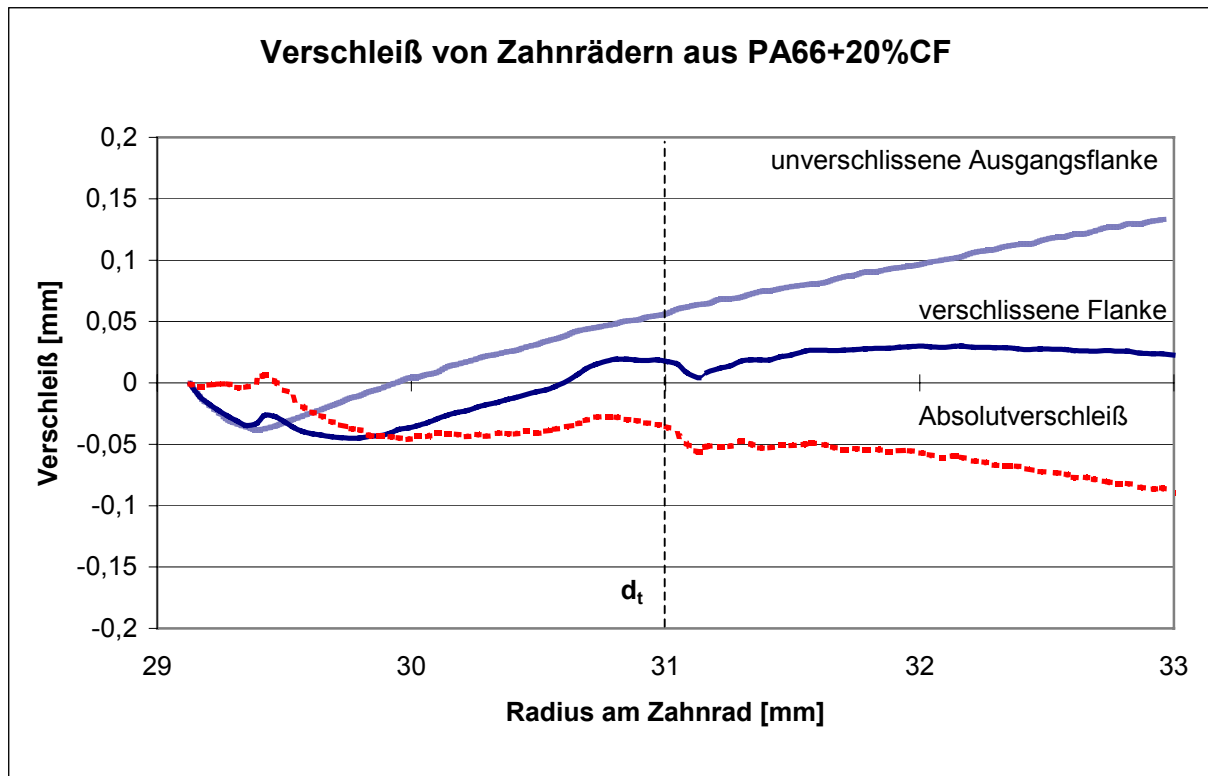


Abb. 60: Verschleißform beispielhaft an einem Zahn, PA66+20%CF/Stahl, trockenlaufend, $F_t/b = 20 \text{ N/mm}$, $N = 1,5 \cdot 10^6$ Lastspiele

POM

Das ungefüllte POM weist eine sehr geringe Kriechverformung mit max. 0,05 mm im Zahnkopf auf (Abb. 61). Somit ist POM dem ungefüllten PA66 auch in der Kriechfestigkeit überlegen. Dies korreliert mit den Ergebnissen aus dem Zeitstand-Zugversuch nach DIN 53444. Hierbei wies das POM einen deutlich höheren Kriechmodul ($E_c = \sigma/\epsilon$) als PA66 bei gleichen Bedingungen auf. So ergab sich für POM ein Kriechmodul von $E_c = 1500 \text{ N/mm}^2$ und für PA66 ein Kriechmodul von $E_c = 1050 \text{ N/mm}^2$ nach einer Belastungszeit von 100h [Sae-92].

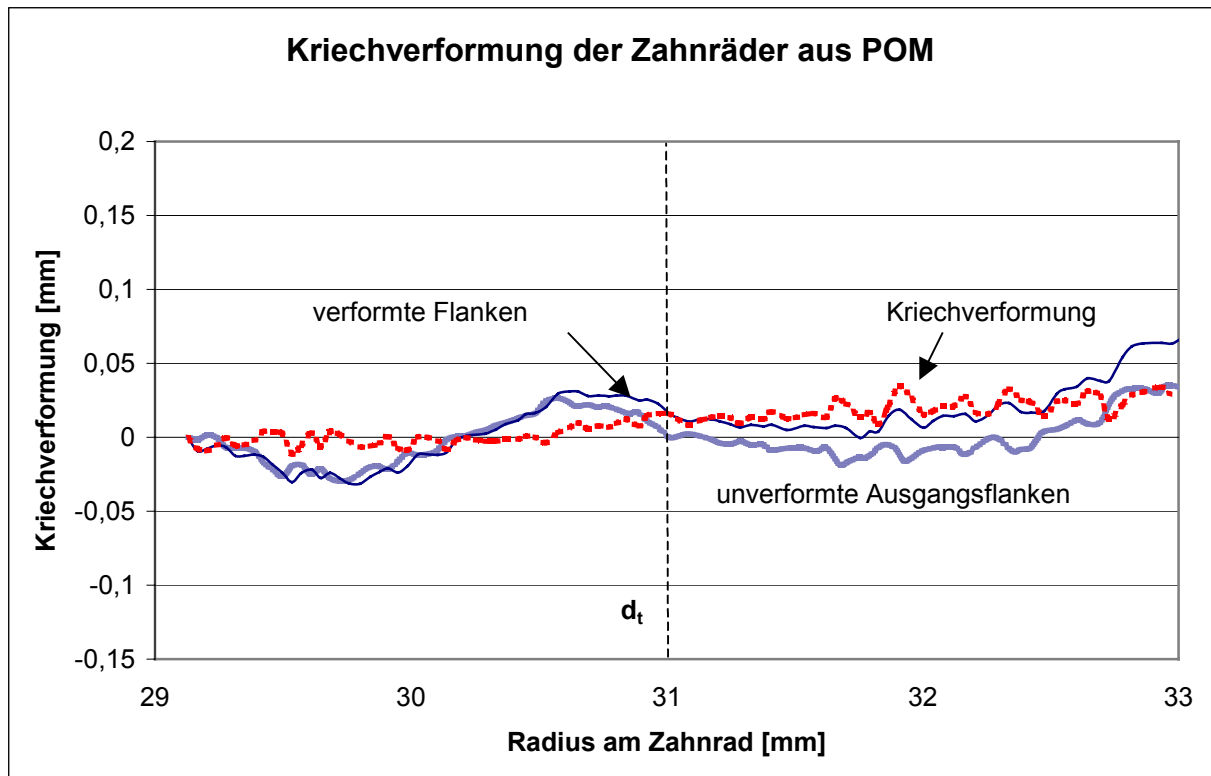


Abb. 61: Kriechverformung beispielhaft an einem Zahn, POM/Stahl, trockenlaufend, $F_t/b = 20 \text{ N/mm}$, $N = 1,5 \cdot 10^6$ Lastspiele

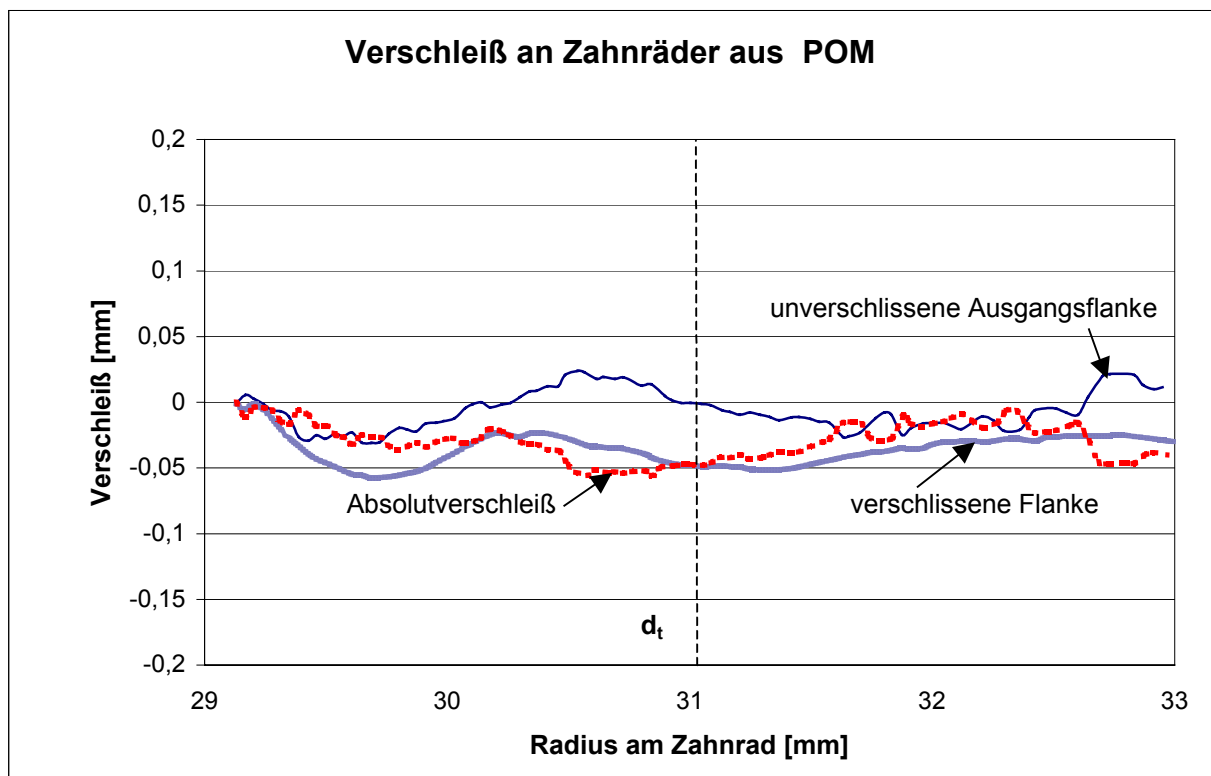


Abb. 62: Verschleißform beispielhaft an einem Zahn, POM/Stahl, trockenlaufend, $F_t/b = 20 \text{ N/mm}$, $N = 1,5 \cdot 10^6$ Lastspiele

Die unverschlissenen Flanken von POM weisen eine zackige Flankenform auf. Dabei handelt es sich um Spuren der Fräsbearbeitung, die durch den Verschleiß glatt geschliffen werden (Abb. 62).

Unter Berücksichtigung der Kriechverformung ergibt sich ein Verschleiß von 0,05 mm in Teilkreisnähe und 0,01 – 0,02 mm in Kopfkreishöhe.

POM+20%CF

Die Kriechverformung bei POM+20%CF beträgt 0,05 bis 0,06 mm im Zahnkopf (Abb.63). Gegenüber dem unverstärkten POM zeigte sich praktisch keine Verringerung der Kriechverformung. Im Vergleich zu PA66+20%CF zeigte sich eine etwas höhere Kriechverformung der Zähne. Somit ist aus der Sicht der Verschleiß- und Kriechfestigkeit die Kombination POM+CF für den trockenlaufenden Betrieb nicht Erfolg versprechend.

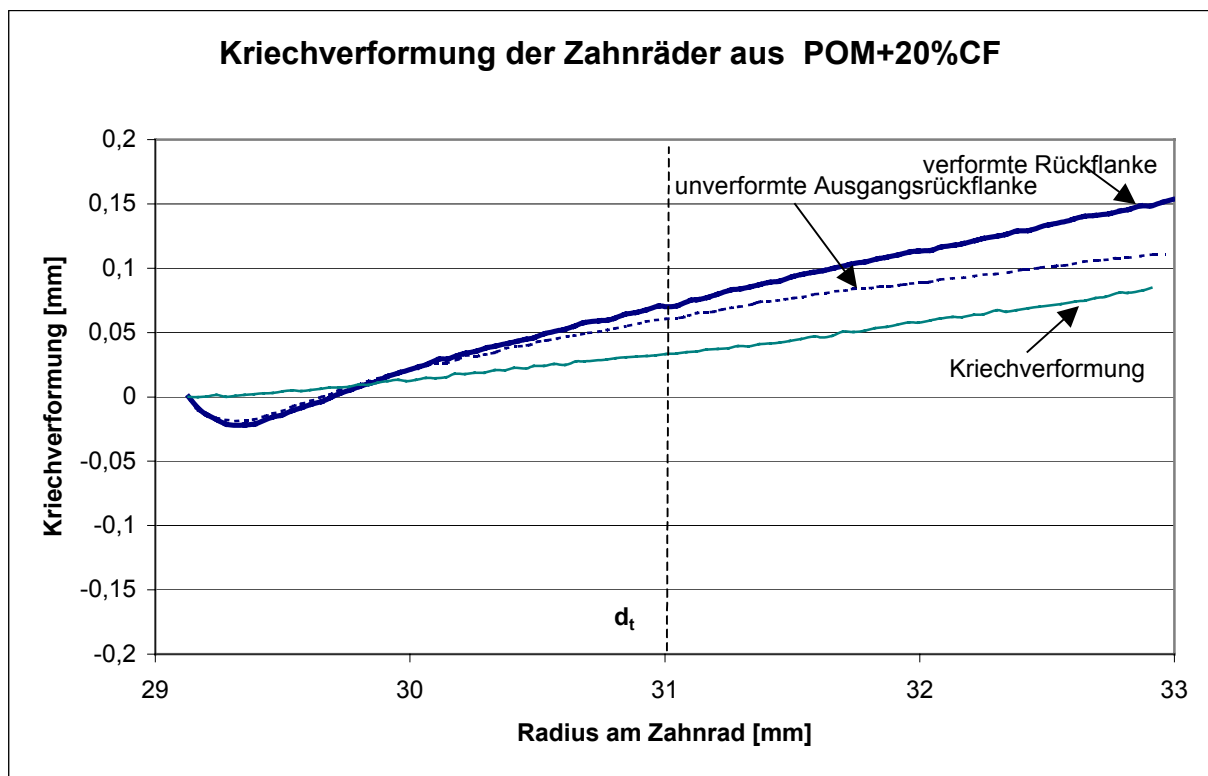


Abb. 63: Kriechverformung beispielhaft an einem Zahn, POM+20%CF/Stahl, trockenlaufend, $F_t/b = 20 \text{ N/mm}$, $N = 1,5 \cdot 10^6$ Lastspiele

Auch bei diesen spritzgegossenen Zahnrädern wird der Profilwinkelfehler durch Verschleiß abgetragen und die Flankenform nähert sich der Evolvente an (Abb. 64).

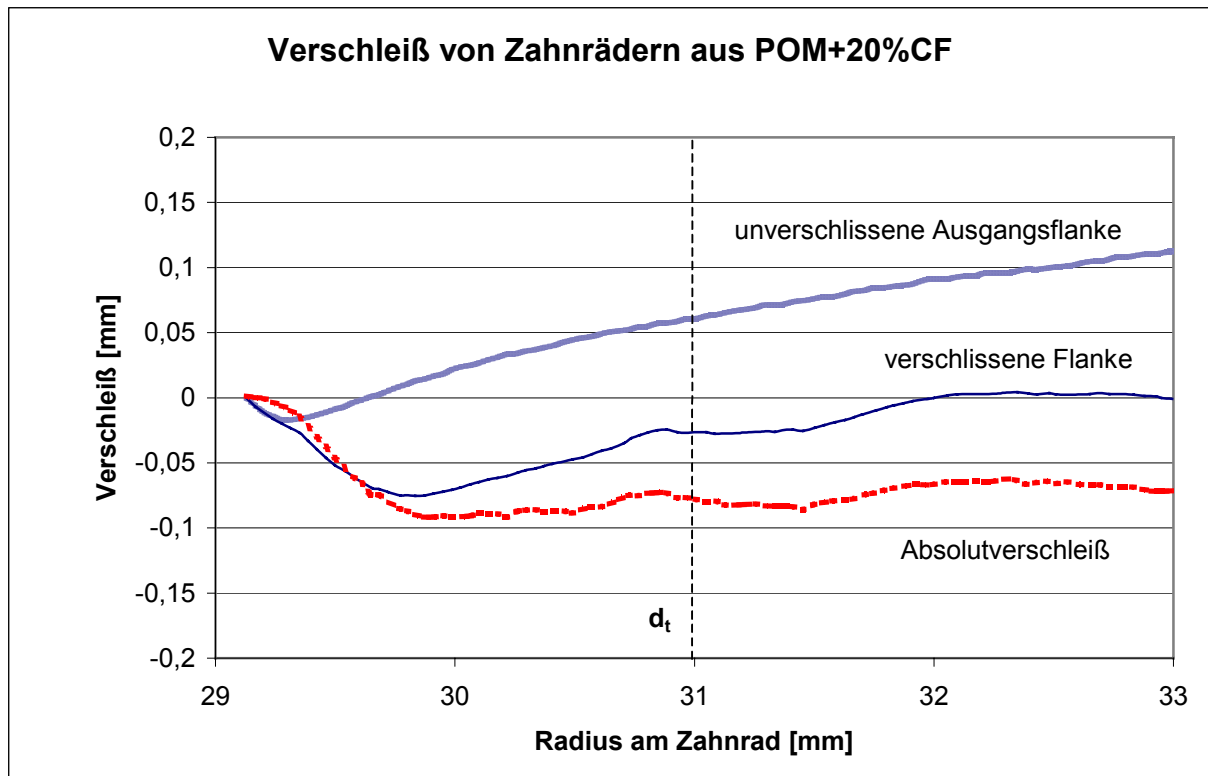


Abb. 64: Verschleißform beispielhaft an einem Zahn, POM+20%CF/Stahl, trockenlaufend, $F_t/b = 20 \text{ N/mm}$, $N = 1,5 \cdot 10^6$ Lastspiele

Der Absolutverschleiß bei POM+20%CF beträgt 0,07 - 0,13 mm in Teilkreisnähe 0,08 mm im Zahnfuß und 0,05 mm bis 0,08 mm im Zahnkopf (Abb. 64).

POM+10%AF+10%PTFE

Die Kriechverformung bei POM+10%AF+10%PTFE beträgt 0,05 bis 0,06 mm im Zahnkopf (Abb. 65). Sie ist damit nicht geringer als die Kriechverformung des Grundwerkstoffes.

Aus Abb. 66 sind deutlich die Spuren der Grübchenbildung zu erkennen (siehe Kap. 5.1.1). Wie bereits im Kap. 5.1.1 erläutert, scheint das PTFE mit dem Grundwerkstoff keinen festen Verbund zu bilden und damit ein Ablösen von Werkstoffpartikeln zu fördern.

Der Verschleiß beträgt bei POM+10%AF+10%PTFE im Zahnfuß 0 bis 0,02 mm und 0,05 bis 0,1 mm im Teilkreis sowie 0,02 bis 0,07 mm im Zahnkopf (Abb. 66).

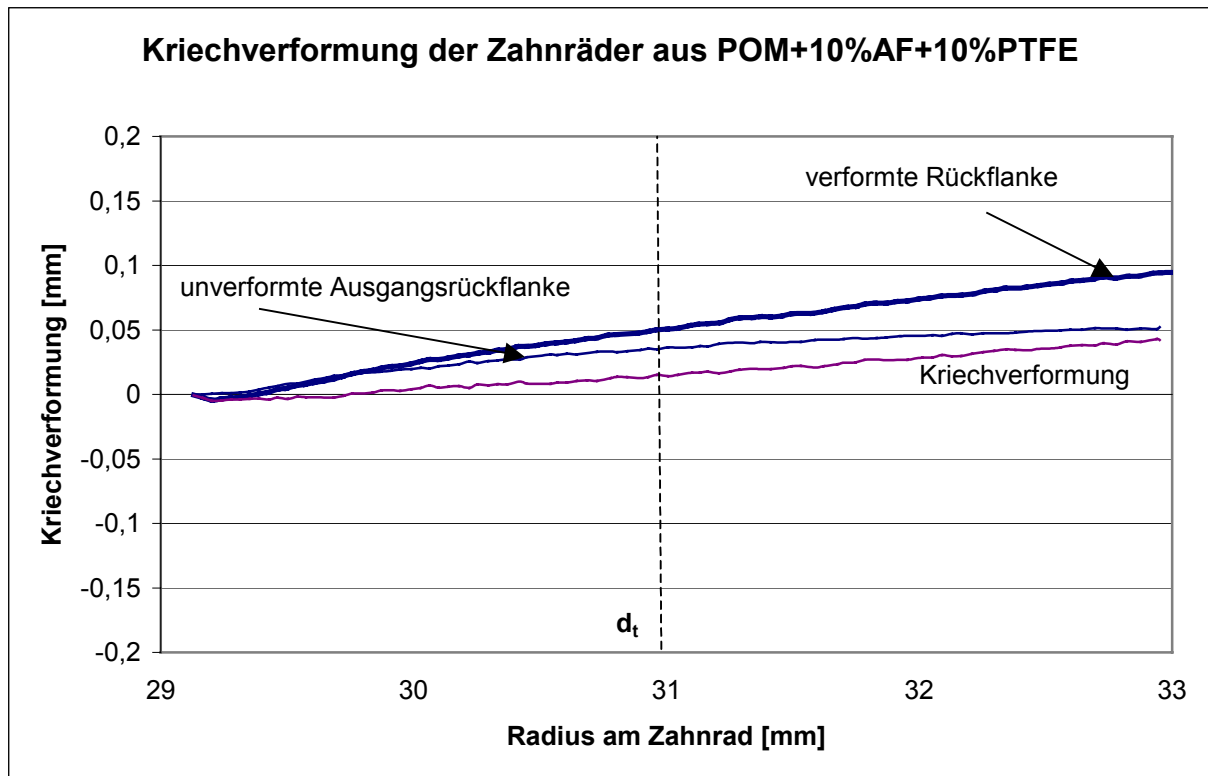


Abb. 65: Kriechverformung beispielhaft an einem Zahn, POM+10%AF+10%PTFE/Stahl, trockenlaufend, $F_t/b = 20 \text{ N/mm}$, $N = 1,5 \cdot 10^6$ Lastspiele

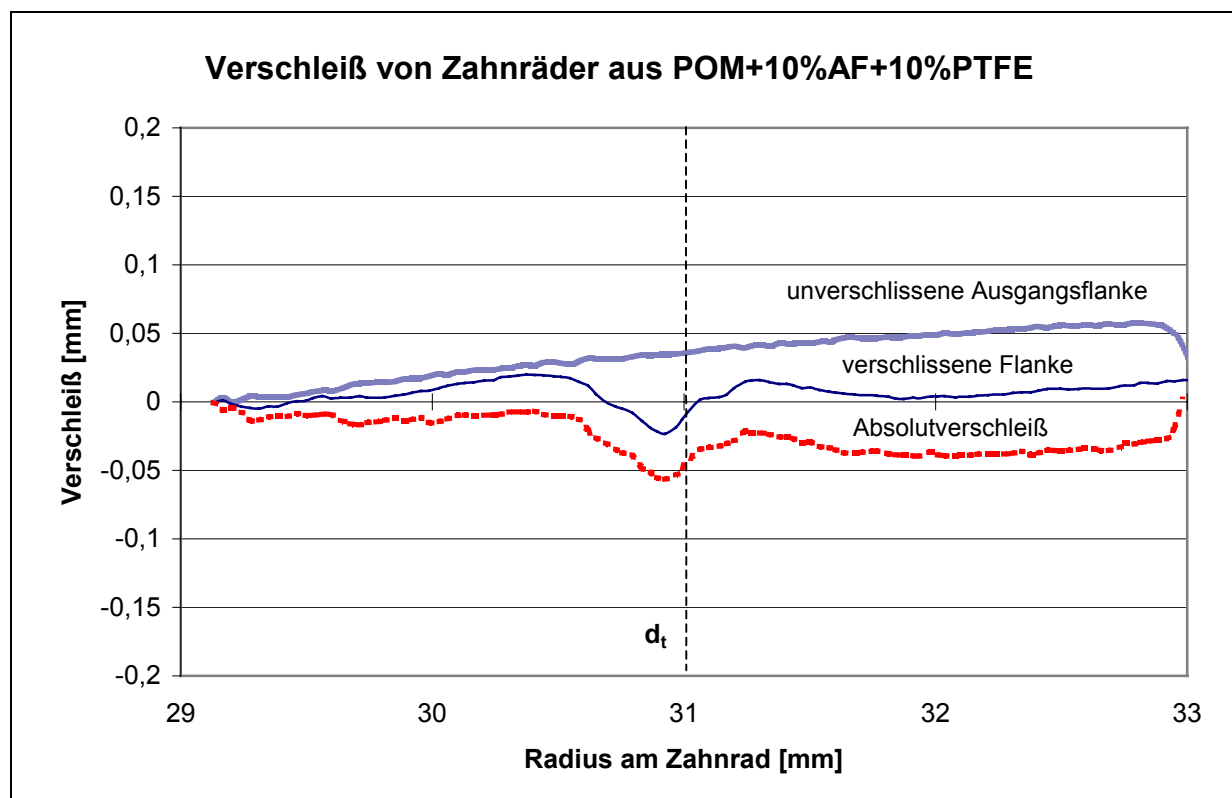


Abb. 66: Verschleißform beispielhaft an einem Zahn, POM+10%AF+10%PTFE/Stahl, trockenlaufend, $F_t/b = 20 \text{ N/mm}$, $N = 1,5 \cdot 10^6$ Lastspiele

Zusammenfassend können für die trockenlaufenden Kunststoffzahnräder folgende Aussagen getroffen werden:

- Das unmodifizierte POM ist dem unmodifizierten PA66 in Verschleiß- und Kriechfestigkeit überlegen.
- Bei Polyamid66 führen die verwendeten Verstärkungsfasern zu einer Verbesserung der Kriechfestigkeit. So weisen alle untersuchten modifizierten Polyamid66 Zahnräder geringere Kriechverformungen auf, als solche aus unmodifiziertem Polyamid66.
- Die Bewertung der Verschleißkurven gestaltet sich aufgrund der unterschiedlichen Ausgangsflanken schwierig. Deutlich wird bei PA66, dass sowohl die Zugabe von 20% Aramidfasern als auch die Zugabe von 15% Aramidfasern mit 10% PTFE zu einer Verschleißreduzierung führen. Eine quantitative Aussage über die Verschleißreduzierung ist nicht möglich. Bei den Zahnradern aus PA66+20%CF zeigten sich im Teilkreis kleinere Verschleißbeträge, im Zahnkopf dagegen größere als bei PA66. Der größere Verschleißbetrag ergibt sich wahrscheinlich aus der fertigungsbedingten Flankenform, die sich erst der Evolventenform annähern muss, weshalb und es zu relativ hohem Verschleiß kommt. Hätte das Zahnrad aus PA66+20%CF eine Flanken ähnlich einer Evolvente, so dürfte der Verschleißbetrag möglicherweise deutlich geringer ausfallen. Ob diese Vermutung zutrifft, sollte anhand von Verschleißbetrachtungen über der Laufzeit bei PA66+20%CF in einem Folgeprojekt gezeigt werden.
- Bei POM konnte durch die Zugabe von 20% Kohlenstofffasern und 10% Aramidfasern mit 10% PTFE keine Verbesserung der Kriech- und Verschleißfestigkeit ermittelt werden. Eine Erklärung für dieses Verhalten konnte anhand der derzeit vorhandenen Werkstoffkennndaten nicht gefunden werden. Für die untersuchten Kunststoffkombinationen fehlen überhaupt geeignete Vergleichskennwerte. Solche Verschleißkennwerte sollten bei relevanten Gleitgeschwindigkeiten, Temperaturen und Beanspruchungsverläufen auf einem Scheibe-Scheibe-Reibprüfstand ermittelt werden.

6 Zusammenhänge und Interpretationen

Ziel dieses Kapitels ist es, die Versuchsergebnisse und deren Zusammenhänge zu verdeutlichen.

6.1 Tragfähigkeit

REMSHARDT [Rems-65] stellte die Vermutung auf, dass sich die Zeitfestigkeit von Kunststoffzahnradern mit steigender Schlagzähigkeit erhöht. Da nicht für alle untersuchten Werkstoffe vergleichbare Schlagzähigkeitswerte zur Verfügung stehen, konnte diese Vermutung nur für einige Kunststoffe geprüft werden. Diese Vermutung wird hier widerlegt. Abb. 67 zeigt das Verhältnis von Bezugslastspielzahl zu Schlagzähigkeit.

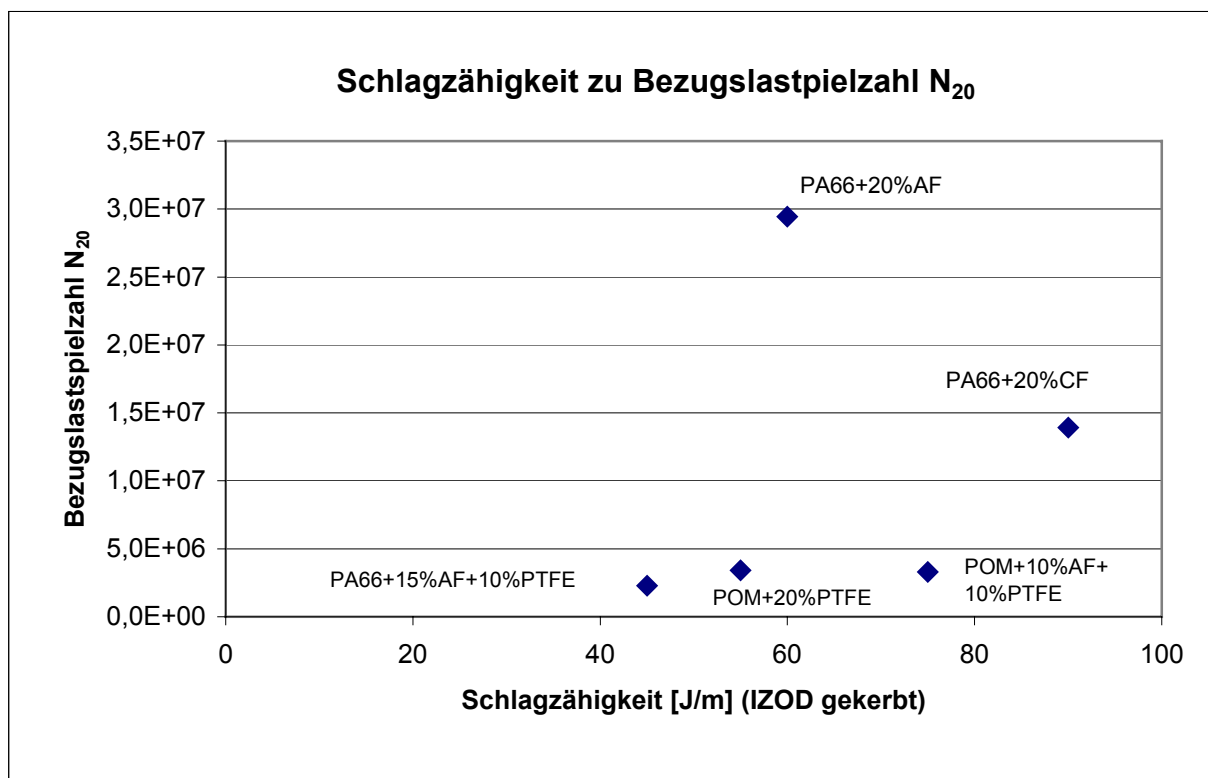


Abb. 67: Verhältnis von Bezugslastspielzahl N_{20} zu Schlagzähigkeit bei trockenlaufenden Zahnradern

Es besteht danach keine nachweisbare alleinige Abhängigkeit zwischen Schlagzähigkeit und Zeitfestigkeit bei den aufgeführten trockenlaufenden Zahnradern. Für trockenlaufende Zahnräder aus Kunststoff kommt es deshalb darauf an, ein Optimum aus hoher Schlagzähigkeit, hoher Biegegeweichselfestigkeit, hoher Verschleißfestigkeit und geringem Reibungskoeffizienten zu finden. Einen

mathematischen Zusammenhang zwischen den einzelnen Größen zu finden, ist aufgrund der Komplexität des Verhaltens von Kunststoffen höchstens im Rahmen neuer Forschungsarbeiten, die sich nur auf diesen Aspekt konzentrieren, möglich.

Bei den ölgeschmierten Zahnrädern aus PEEK zeigten sich selbst bei hohen Temperaturen gute Tragfähigkeiten. So wurden z. B. mit PEEK CA30 bei 120°C höhere Belastungskennwerte als mit PA12+GF bei 90°C und ähnliche wie bei POM bei 60°C erreicht (siehe Kap. 8.3). Die bisherige obere Einsatzgrenze von Kunststoffzahnradern lag bei ca. 80°C [TuMe-91] bis 100°C [Shel-79]. Mit den vorgestellten Ergebnissen für ölgeschmierte Zahnräder aus PEEK wurde diese obere Einsatzgrenze auf 120°C erhöht. PEEK CA30 besitzt vor PEEK 450G und PEEK FC30 die höchste Tragfähigkeit.

Erhöhte Umgebungstemperaturen führen bei Kunststoffzahnradern allgemein zu verringerten Zeitfestigkeiten. Zudem erhöht die Ölschmierung die Zeitfestigkeit gegenüber dem trockenlaufenden Betrieb. Mit Abb. 68 wird belegt, dass sich bei PEEK 450G die Ölschmierung deutlich positiv auswirkt. Es kommt trotz höheren Temperaturen mit 120°C zu höheren Zeitfestigkeiten als bei trockenlaufenden Zahnrädern unter Raumtemperatur. Der relativ hohe Reibungskoeffizient von PEEK 450G, welcher im trockenlaufenden Betrieb zu einer hohen Temperaturentwicklung führt, wird durch die Ölschmierung abgebaut. Weiter zeigt PEEK 450G bis zur Glasatemperatur ($T_g = 143^\circ\text{C}$) nur einen geringen Festigkeitsabfall, was erst deutlich geringere Zeitfestigkeiten oberhalb dieser Temperatur erwarten lässt. Ein Vergleich mit den Tragfähigkeiten bei Fettschmierung zeigt ähnliche Werte. Die Versagensmechanismen sind gleich. Auch dort führte Grübchenbildung mit anschließenden Anrissen zum Versagen. Gleiche Tendenzen stellte auch KLEIN [Klein-67] an Zahnrädern aus POM fest. Auch hier waren die Tragfähigkeiten der ölgeschmierten Zahnräder ähnlich die der fettgeschmierten Zahnräder. Die Grübchenbildung könnte durch einen geringeren E-Modul oder andere Zahnformen (mit größerem Flankenradius bei pos. Profilverschiebung) verringert werden.

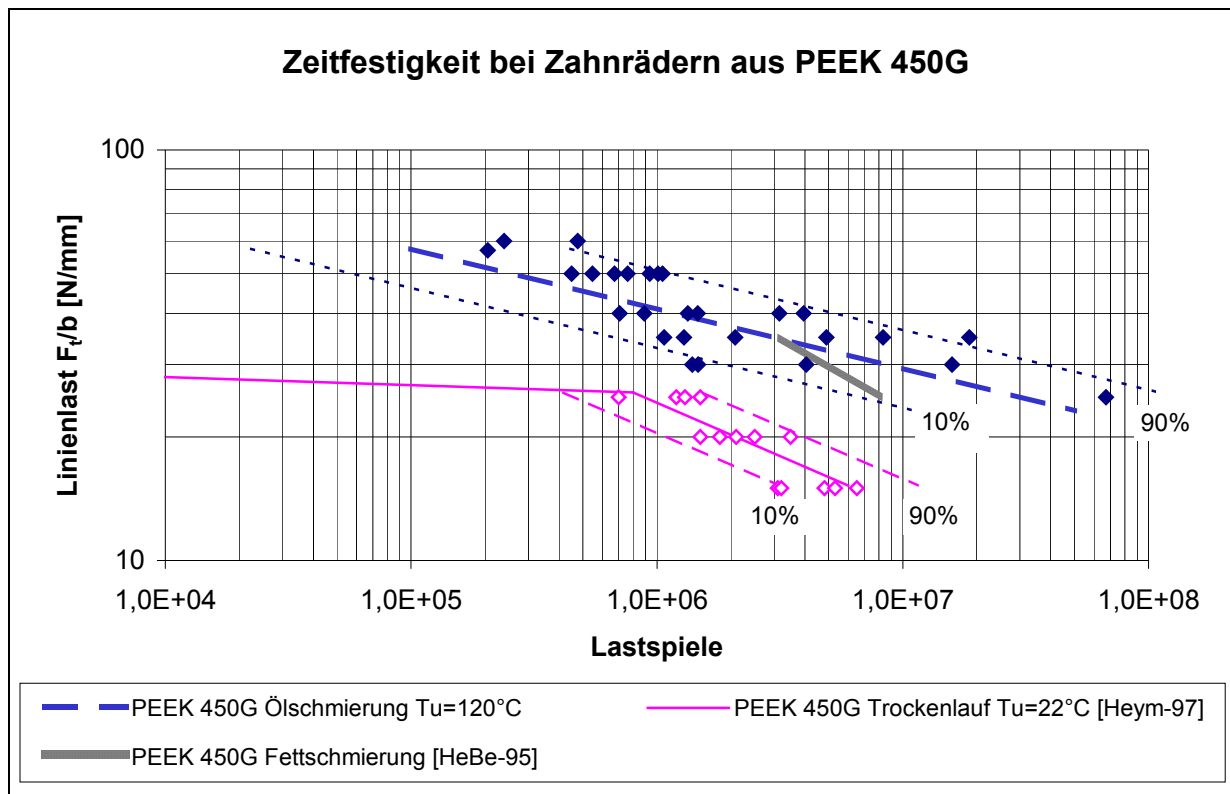


Abb. 68: Vergleich der Zeitfestigkeiten bei geschmierten und trockenlaufenden Zahnrädern aus PEEK 450G, $v_t = 7,5\text{m/s}$, $m = 2\text{mm}$

Abb. 69 verdeutlicht noch einmal alle Tragfähigkeiten der untersuchten trockenlaufenden Polyamide und POM. Es konnten Kunststoffe mit besseren Tragfähigkeiten als bei dem bisherigen Standardkunststoff POM ermittelt werden.

Die Zugabe reibungsmindernder Zusätze (PTFE) führte bei PA66+15%AF+10%PTFE erwartungsgemäß zu einer Erhöhung der Anschmelzlast gegenüber PA66+20%AF (Abb. 69). Dagegen zeigte sich im mittleren und unteren Lastbereich eine Verringerung der Zeitfestigkeit. Die ermittelten Zeitfestigkeiten sind bei diesen Lastspielzahlen vergleichbar mit denen von POM.

Trockenlaufende Zahnräder aus POM+10%AF+10%PTFE weisen bei hohen Lastspielzahlen ähnliche Zeitfestigkeitskennwerte wie Zahnräder aus PA66+15%AF+10%PTFE auf (siehe Abb. 69 und Abb.70).

Kohlenstofffaserverstärkung bewirkt bei PA66 eine deutliche Tragfähigkeitssteigerung in allen untersuchten Lastbereichen gegenüber unmodifiziertem PA66. Diese Tragfähigkeitssteigerung ist allerdings geringer als bei Aramidfaserverstärkung. Die höheren Zeitfestigkeiten von PA66+20%AF gegenüber PA66+20%CF liegen auch an dem etwas besseren Wirkungsgrad (siehe Kap. 5.3)

und der daraus resultierenden geringeren Erwärmung der Kunststoffzähne (siehe Kap. 5.2).

POM mit Kohlenstofffasern weist dagegen keine so deutlichen Tragfähigkeitsteigerungen gegenüber unmodifiziertem POM auf (Abb. 69).

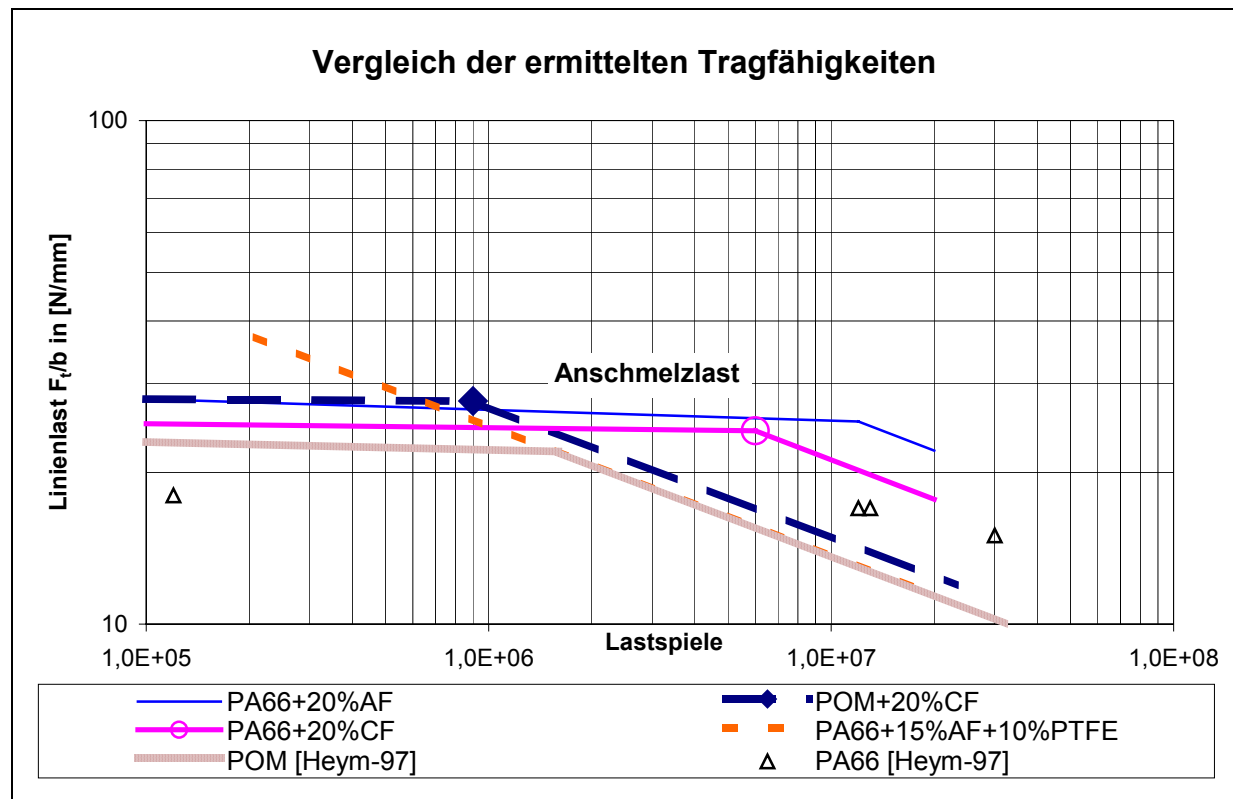


Abb. 69: Vergleich der ermittelten Tragfähigkeiten bei trockenlaufenden Zahnrädern

Aus Abb. 70 ist zu erkennen, dass bei POM mit Aramidfaserverstärkung und PTFE keine Verbesserung in der Zeitfestigkeit bei hohen Lastspielzahlen gegenüber POM und POM+22%PTFE erreicht wurde. POM+22%PTFE zeigt im untersuchten Bereich wegen des besseren Wirkungsgrades ($\eta = 96,5\%$ [Heym-97]) keine Anschmelzgrenze. Eine Erhöhung des Anteils an Aramidfasern führt offensichtlich bei POM zu einer deutlichen Steigerung des Reibungskoeffizienten mit Verringerung des Wirkungsgrades. Somit scheint eine Optimierung in diese Richtung nicht erfolgversprechend zu sein. Eine Erhöhung des PTFE-Anteils bei größerem Aramidfaseranteil erscheint ebenfalls wenig erfolgversprechend. Zudem sind hier die höheren Materialkosten zu berücksichtigen.

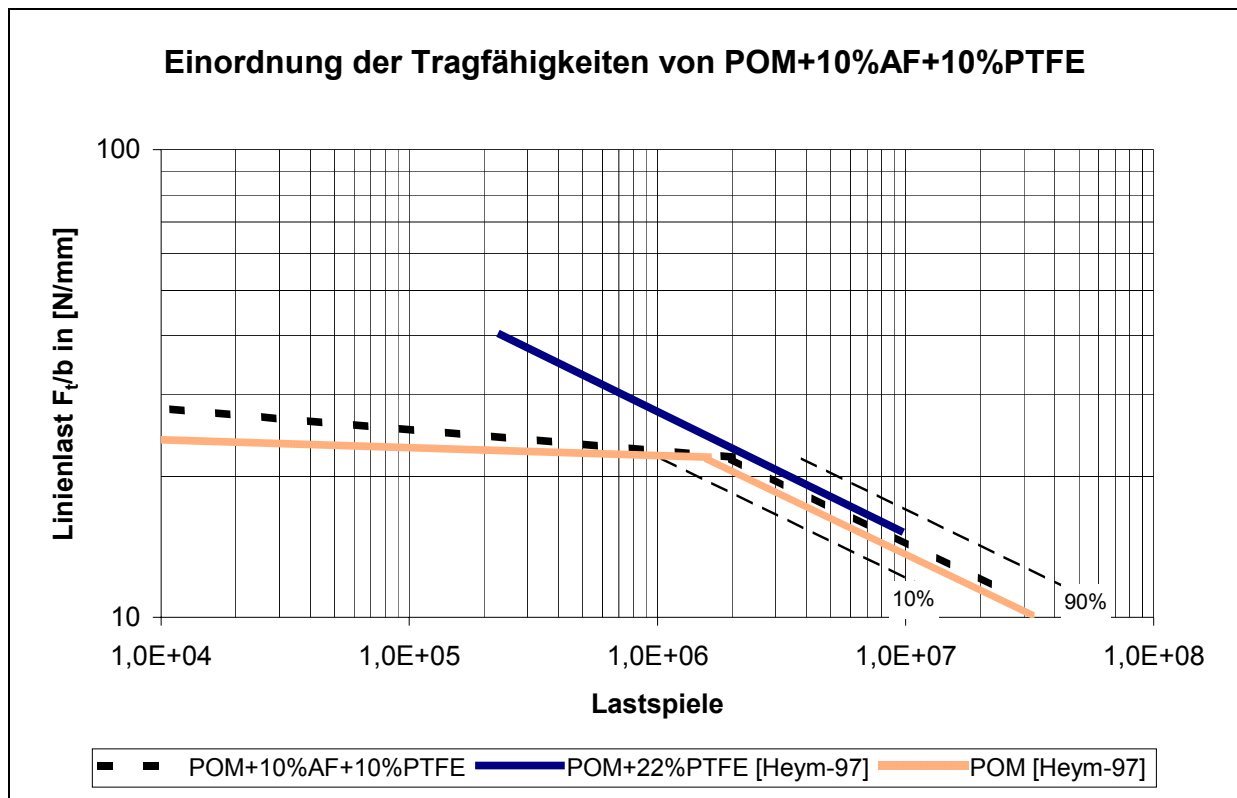


Abb. 70: Vergleich der ermittelten Tragfähigkeiten für POM mit Füllstoffen im Trockenlauf

PEEK FC30 ist dem unmodifizierten PEEK 450G im Trockenlauf bei hohen Lasten $F_t/b > 23$ N/mm überlegen (Abb. 71). Hier kommen die besseren tribologischen Eigenschaften zum Tragen. Bei niedrigeren Lastbereichen wirken zwei Effekte. Zum einen ist die Zahnmasse-temperatur bei PEEK FC30 bei gleicher Last geringer als bei PEEK 450G. Zum anderen stellte HEYM [Heym-95] bei Pulsatorversuchen bei PEEK 450G eine höhere Zahnfußtragfähigkeit gegenüber dem PEEK FC30 bei Raumtemperatur fest. Diese beiden Mechanismen scheinen sich zu kompensieren. Die ursprünglich höhere Zahnfußtragfähigkeit wird durch die höheren Temperaturen verringert.

Gegenüber POM zeigt PEEK FC30 nur bei niedrigen Lastspielen eine höhere Tragfähigkeit. Wo POM bereits anschmilzt, besitzt PEEK FC30 immer noch eine gewisse Zeitfestigkeit. Dies liegt an dem geringeren Reibungskoeffizienten und an der deutlich höheren Schmelztemperatur. Bei mittleren und hohen Lastspielzahlen sind die Zeitfestigkeitswerte von POM und PEEK FC30 fast gleich.

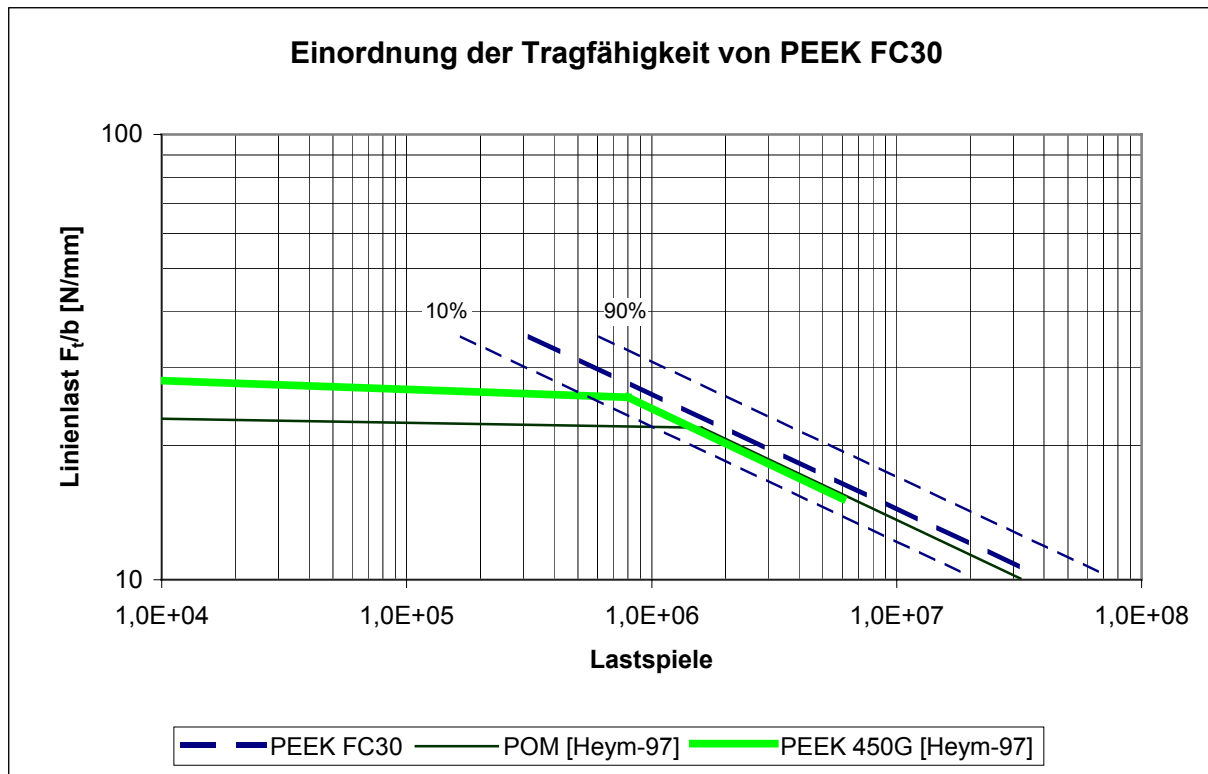


Abb. 71: Vergleich der Zeitfestigkeiten von PEEK FC30 mit POM und PEEK, trockenlaufend, 50% Ausfallwahrscheinlichkeit, Paarung Kunststoff/Stahl, $m = 2 \text{ mm}$, $v_t = 7,5 \text{ m/s}$

Die trockenlaufenden Kunststoffzahnäder hatten mit einem Neigungsexponenten von $k = 3,85$ einen geringeren Lasteinfluss auf die erreichbare Lastspielzahl gegenüber den ölgeschmierten Kunststoffzahnäder mit $k = 6,83$. Die verschiedenen Neigungsexponenten und Streubreiten resultieren aus den unterschiedlichen Versagensarten. Bei den trockenlaufenden Kunststoffzahnädern ergab sich eine geringere Streuspanne ($T_N = 1 : 5,5$) gegenüber den ölgeschmierten Kunststoffzahnädern ($T_N = 1 : 39,7$). Eine Ursache für die größere Streuspanne ist der „flachere“ Verlauf der Wöhlerlinie bei den ölgeschmierten Kunststoffzahnädern.

6.2 Zahnmasse­temperatur

Bei der Darstellung der Zahnmasse­temperatur in Abhängigkeit vom dynamischen Reibungskoeffizienten (Definition Kap. 2.3) wird deutlich, dass nur eine tendenzielle Steigerung der Zahnmasse­temperatur mit steigendem Reibungskoeffizienten zu verzeichnen ist (Abb. 72). Da der Reibungskoeffizient bei Kunststoffen stark von den Oberflächentemperaturen beeinflusst wird, wird eine größere Abhängigkeit von der tatsächlichen Zahnflankentemperatur erwartet.

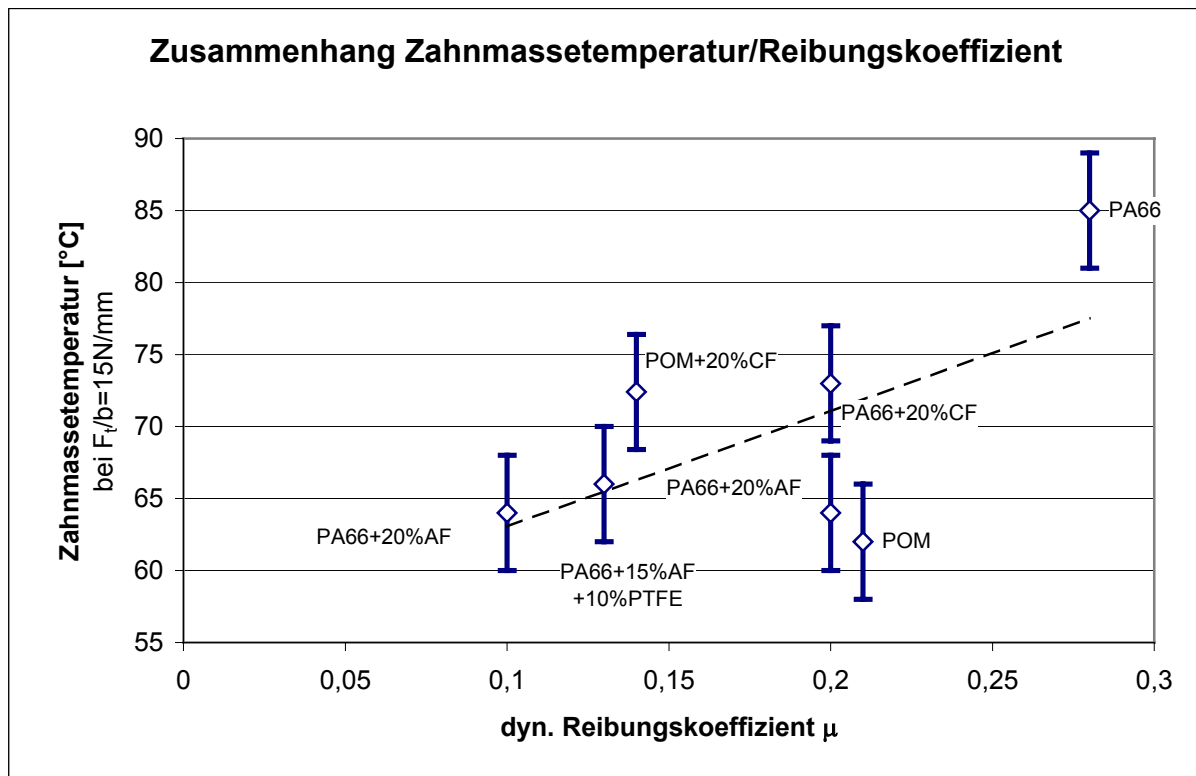


Abb. 72: Zusammenhang zwischen Zahnmasse­temperatur und dynamischem Reibungskoeffizienten

6.3 Wirkungsgrad

Eine einfache Korrelation zwischen Wirkungsgrad und Anschmelzlast ist nicht bei allen Kunststoffen zu beobachten, da sich insbesondere die Schmelztemperaturen T_m der einzelnen Kunststoffe stark unterscheiden (T_m (PA66) = 255°C, T_m (POM) = 165°C). Innerhalb der Polyamide ergibt sich eine gute Korrelation der Anschmelzlasten mit den gemessenen Wirkungsgraden. So zeigte ungefülltes PA66 (η = 87,5 - 89%) die niedrigste Anschmelzlast. Bei PA66+15%AF+10%PTFE (η = 93 - 95%) wurden dagegen keine Anschmelzungen im untersuchten Lastbereich (bis F_t/b = 35 N/mm) festgestellt.

Aus Abb. 72 ist erkennbar, dass die Höhe der Anschmelzlast proportional der Schmelztemperatur und des Wirkungsgrades zu sein scheint ($\sim \frac{1-\eta}{T_m - T_U}$). Ausnahme bildet hierbei nur POM+20%CF. Das hieße, wenn für einen Werkstoff Anschmelzlast, Wirkungsgrad und Schmelztemperatur bekannt wäre, so ließe sich unter gleichen Bedingungen für jeden weiteren Werkstoff, mit bekannten Wirkungsgrad und Schmelztemperatur die Höhe der zu erwartenden Anschmelzlast abschätzen.

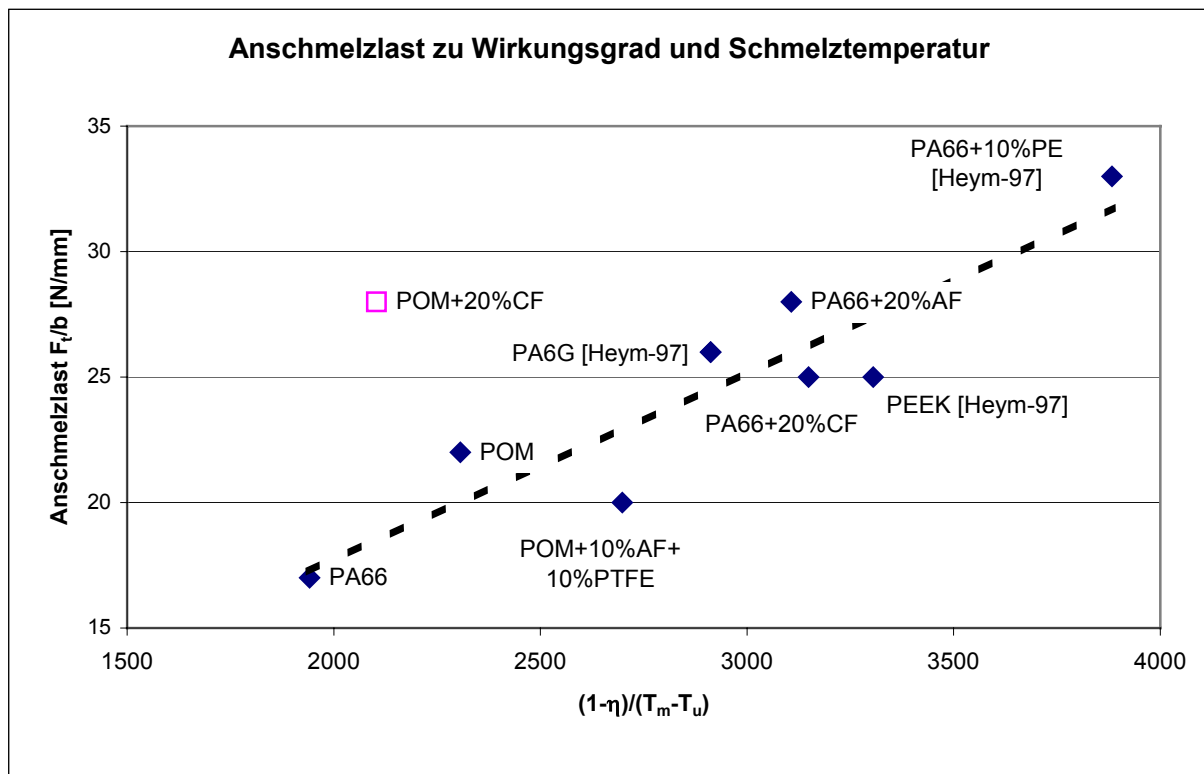


Abb. 73: Zusammenhang zwischen Anschmelzlast, Wirkungsgrad und Schmelztemperatur, Paarung Kunststoff/Stahl, m = 2 mm, v_t = 7,5 m/s

Um den Einfluss des Reibungskoeffizienten auf den Verzahnungswirkungsgrad zu verdeutlichen, wurde der experimentell ermittelte Wirkungsgrad in Abhängigkeit vom Reibungskoeffizienten aus Literaturangaben [LNP] dargestellt. Da der Reibungskoeffizient von den einzelnen Systemparametern abhängt, müsste er eigentlich in Abhängigkeit von den Systemparametern (z.B. Gleitgeschwindigkeit, Oberflächentemperatur) verfügbar sein. Solche Werte stehen aber für diese Arbeit nicht zur Verfügung. Die zitierten Literaturwerte wurden auf einem Druckscheibenprüfstand ermittelt, bei dem die Systemparameter nur begrenzt mit dem höherfrequenten intermittierenden Wälzkontakt beim Zahneingriff zu vergleichen sind. Somit können mit den zur Verfügung stehenden Literaturwerten lediglich Tendenzen aufgezeigt werden.

Abb. 74 zeigt, dass eine Korrelation zwischen Reibungskoeffizient und Wirkungsgrad in erster Näherung erkennbar ist. Aus Abb. 74 geht hervor, dass ein Werkstoff mit niedrigem Reibungskoeffizienten einen hohen Wirkungsgrad aufweist.

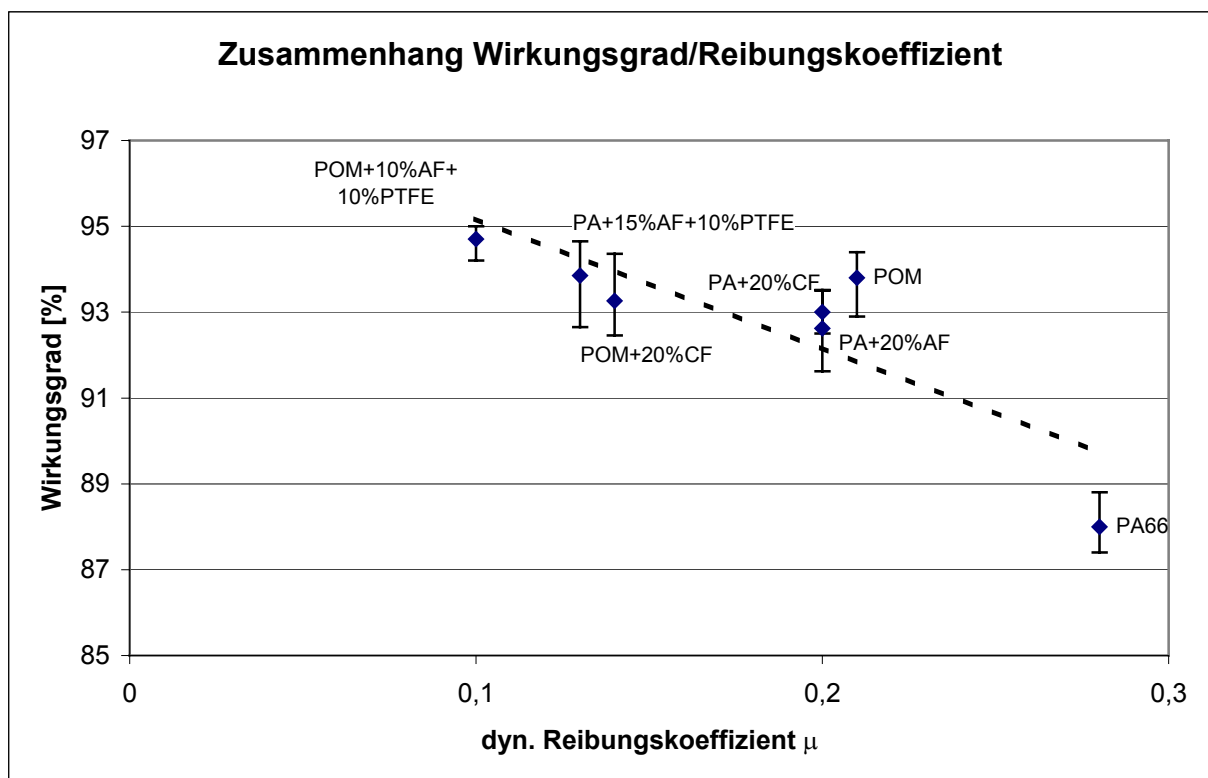


Abb. 74: Zusammenhang zwischen Reibungskoeffizient und Wirkungsgrad an trockenlaufenden Kunststoffzahnradern

Wie bereits erwähnt, ist der Reibungskoeffizient stark von den jeweiligen Systemparametern abhängig. Ein vereinfachter Ansatz zur Berechnung des

Zusammenhanges zwischen dem mittleren Reibungskoeffizienten μ_m und dem gemessenen Wirkungsgrad η ist in [NiWi-83] beschrieben.

Die mittlere Reibleistung P_R errechnet sich aus $P_R = \mu_m \cdot F_{n,m} \cdot v_{g,m}$. Der Einfluss der Dämpfung wird dabei vernachlässigt.

Dabei ergibt sich die mittlere Zahnnormalkraft $F_{n,m}$ aus Nennlast F_n und Überdeckungsgrad ε_α .

$$F_{n,m} = \frac{F_n}{\varepsilon_\alpha} \quad (6 - 1)$$

$$\text{Die mittlere Gleitgeschwindigkeit ergibt sich aus } v_{g,m} = (v_{g,A} + v_{g,E}) / 4 \quad (6 - 2)$$

Der Wirkungsgrad lässt sich mit der Reibleistung wie folgt darstellen:

$$\eta = 1 - \frac{P_R}{P} = 1 - \frac{\mu_m \cdot F_n / \varepsilon_\alpha \cdot v_{g,m}}{F_n \cdot \cos \alpha \cdot v_t} = 1 - \frac{\mu_m \cdot v_{g,m}}{\varepsilon_\alpha \cdot \cos \alpha \cdot v_t} \quad (6 - 3)$$

Mit den für das Prüfgetriebe und die untersuchten Prüfparameter relevanten Größen $\varepsilon_\alpha = 1,62$, $v_{g,A} = 2,86$ m/s, $v_{g,E} = 2,72$ m/s, $v_t = 7,5$ m/s, $\alpha = 20^\circ$ ergibt sich

$$\eta = 1 - \mu_m \cdot 0,122. \quad (6 - 4)$$

Damit lässt sich der mittlere Reibungskoeffizient für die untersuchte Paarung aus

$$\mu_m = \frac{1 - \eta}{0,122} \text{ ermitteln.}$$

Werkstoff	POM	POM+ 20%CF	POM+10%AF +10%PTFE	PA66	PA66+ 20%CF	PA66+15%AF+ 10%PTFE	PA66+ 20%AF
mittlerer η [%]	93,8	93,2	94,7	88	92,6	93,8	92,5
μ_m	0,51	0,58	0,44	0,98	0,61	0,51	0,573
μ [LNP]	0,21	0,14 [15%CF]	0,1	0,28	0,2	0,13	0,2

Tab. 15: Berechnung des mittleren Gleitreibungskoeffizienten aus dem Wirkungsgrad und Vergleich mit dynamischen Gleitreibungskoeffizienten [LNP]

Deutlich sichtbar wird der starke Unterschied zwischen dem Gleitreibungskoeffizienten nach Herstellerangaben μ und dem mittleren errechneten Gleitreibungskoeffizienten μ_m (Tab. 15). Ursache dafür sind die unterschiedlichen Oberflächentemperaturen der beiden Messungen. Der mittlere errechnete Gleitreibungskoeffizient μ_m ist eine bessere Angabe für die realen

Gleitreibungsverhältnisse als die Gleitreibungsverhältnisse aus den Literaturangaben.

Auffallend ist der extrem hohe Reibungskoeffizient bei PA66, der nahezu eins ist. Eine Erklärung dafür geben die Untersuchungen des Reibungskoeffizienten in Abhängigkeit von der Oberflächentemperatur (Abb. 75) von [ErStr-72]. Im Bereich A zeigt sich bei PA66 eine geringe Abhängigkeit des Reibungskoeffizienten von der Gleitflächentemperatur. Dagegen verkleben im Bereich B die Gleitflächen, so dass der Gleitreibungskoeffizient bis zu einem Wert von nahezu zwei ansteigt und anschließend bei einer Gleitflächentemperatur von ca. 240°C bis gegen $\mu=0$ abfällt [ErStr-72].

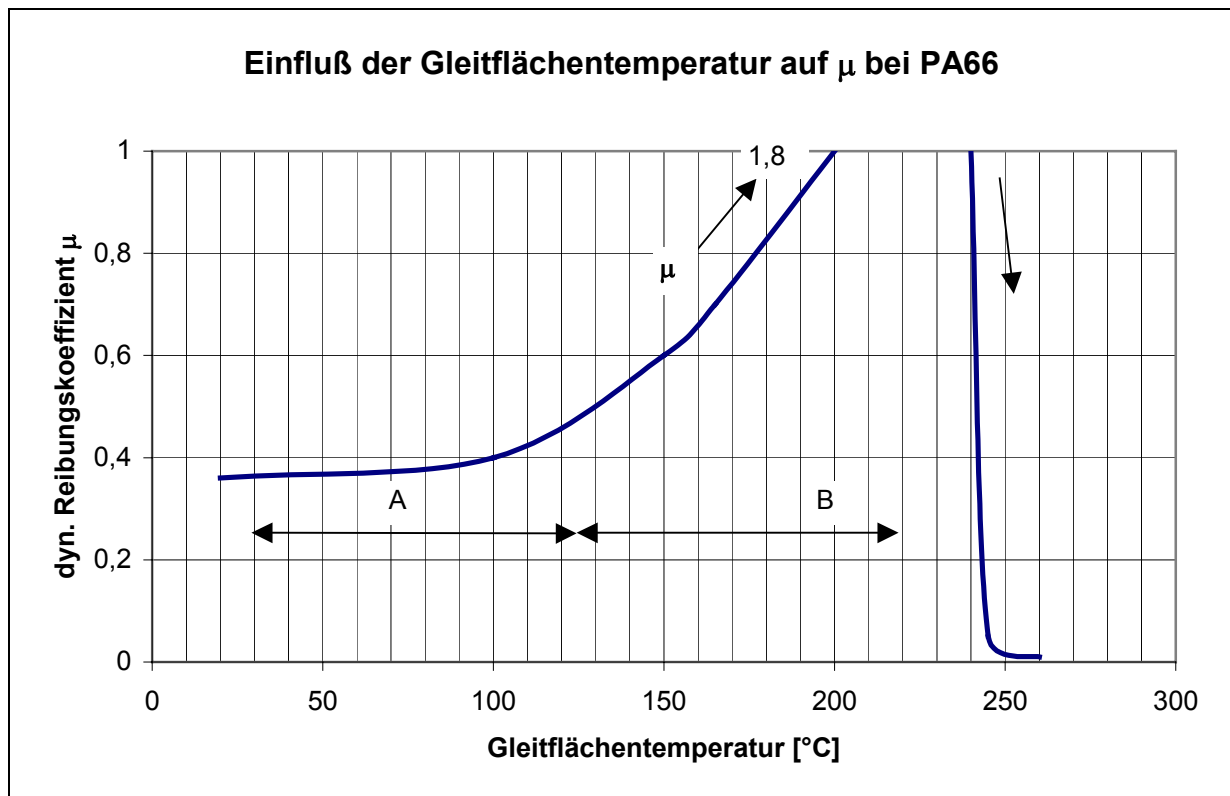


Abb. 75: Prinzipieller Kurvenverlauf des dynamischen Gleitreibungskoeffizienten als Funktion der Gleitflächentemperatur bei PA66, nach [ErStr-72]

Das Verkleben der Gleitflächen beginnt ab einer Oberflächentemperatur von etwa 110°C. Da der LNP - Reibungskoeffizient bei deutlich geringeren Geschwindigkeiten aufgenommen wurde, ist davon auszugehen, dass die hohe Gleitflächentemperatur und damit der Bereich der Verklebungen nicht erreicht wurde.

Messungen der Oberflächentemperaturen von Zahnrädern aus PA66 sind nicht bekannt. Trotzdem wurden sie in dieser Arbeit wegen der enorm hohen Kosten und

des Aufwandes nicht durchgeführt. HEYM [HeBe-95] zeigte mit Zahnflankentemperaturmessungen an trockenlaufendem POM in der Paarung mit einem Stahlzahnrad Zahnflankentemperaturen von 127°C . Aufgrund des um annähernd 5% schlechteren Wirkungsgrades von PA66 gegenüber POM ist mit deutlich höheren Zahnflankentemperaturen zu rechnen. Somit ist eine Erklärung für das kurzzeitige Verkleben der Zahnflanken gegeben. Die Spuren der Verklebungen sind an den Oberflächen von den Zahnrädern aus PA66 (Abb. 76) deutlich zu erkennen. Das stark temperaturabhängige Verhalten der Reibung bei PA66 erklärt auch die deutlichen Unterschiede der Wirkungsgradmessungen früherer Arbeiten. So bestimmte HEYM [Heym-97] bei $v_t = 1,9 \text{ m/s}$ ($F_t/b = 30 \text{ N/mm}$) einmal einen Wirkungsgrad von $\eta = 93\%$ und bei $v_t = 7,5 \text{ m/s}$ ($F_t/b = 10 \text{ N/mm}$) ein $\eta = 86\%$ [HeBe-95]. Bei geringeren Umfangsgeschwindigkeiten zeigen sich geringere Zahnmasse Temperaturen, $T_z = 50^{\circ}\text{C}$ bei $v_t = 1,9 \text{ m/s}$ gegenüber $T_z = 70^{\circ}\text{C}$ bei $v_t = 7,5 \text{ m/s}$, welche geringere Reibungskoeffizienten zur Folge haben.

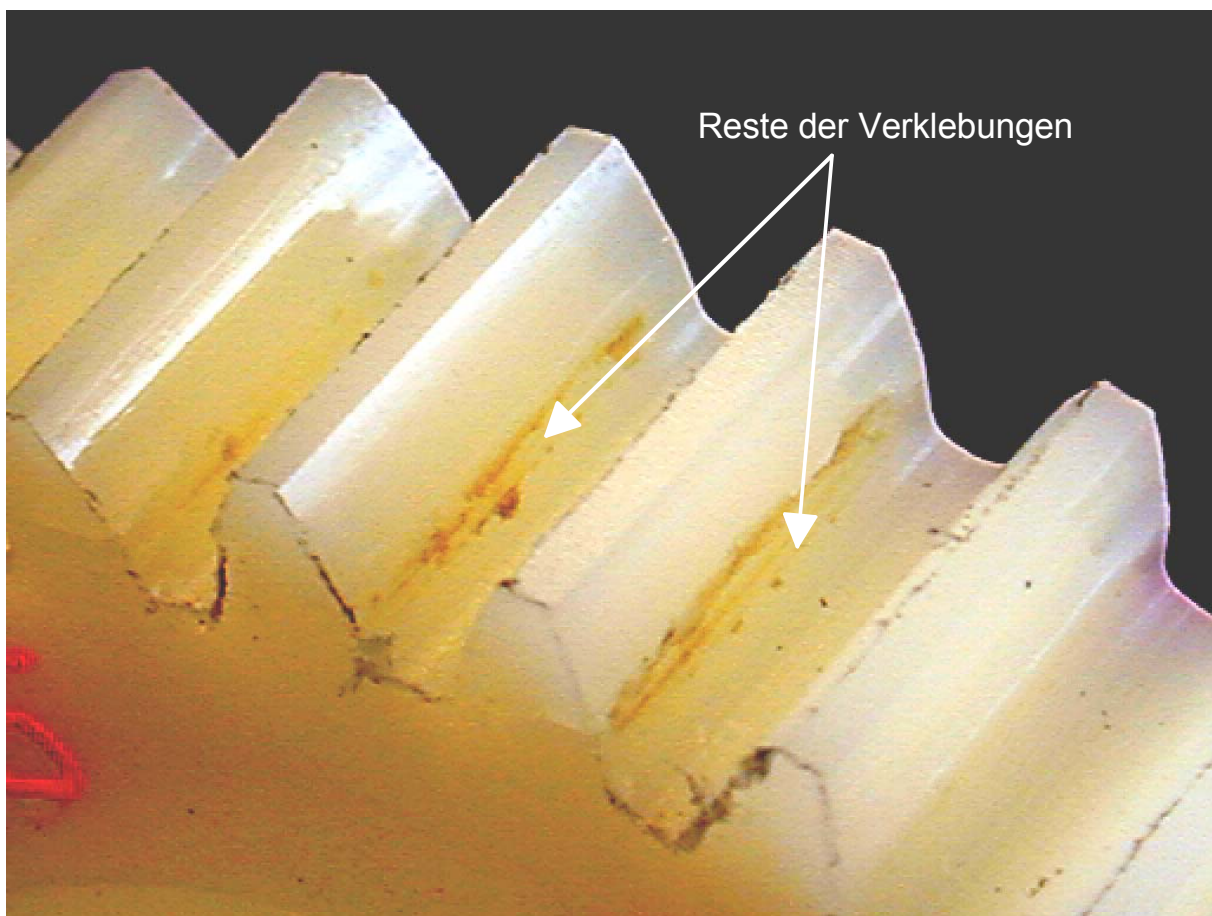


Abb. 76: Spuren der Verklebungen an Zahnrädern aus Polyamid66

7 Einordnung der Ergebnisse nach der Richtlinie VDI-2545

Für eine übersichtlichere Beurteilung der ermittelten Tragfähigkeitskennwerte werden diese mit den Kennwerten aus der VDI Richtlinie 2545 verglichen.

7.1 Zahnfußspannungen

Die folgenden Diagramme vergleichen die ermittelten ertragbaren Zahnfußspannungen (10% Ausfallwahrscheinlichkeit) mit den in der VDI Richtlinie 2545 [VDI-2545] für die Standardkunststoffe angegebenen Festigkeitswerten (Rechnung siehe Anhang). Bedingung für den Vergleich ist, dass ein reiner Zahnfußbruch vorliegt. Deshalb wurde auf den Vergleich der ölgeschmierten Zahnräder (Zahnbruch an der Flanke) verzichtet.

Abb. 77 zeigt, dass durch die Faserverstärkung bei Polyamiden eine Erhöhung der Zahnfußfestigkeit gegenüber PA66 bei gleicher Zahnmasse-temperatur zu verzeichnen ist. Da bei gleicher Last die Zahnmasse-temperatur T_z beim PA66 deutlich höher ist als bei den modifizierten PA66 (siehe Kap. 5.2), sind die Steigerungen beträchtlich.

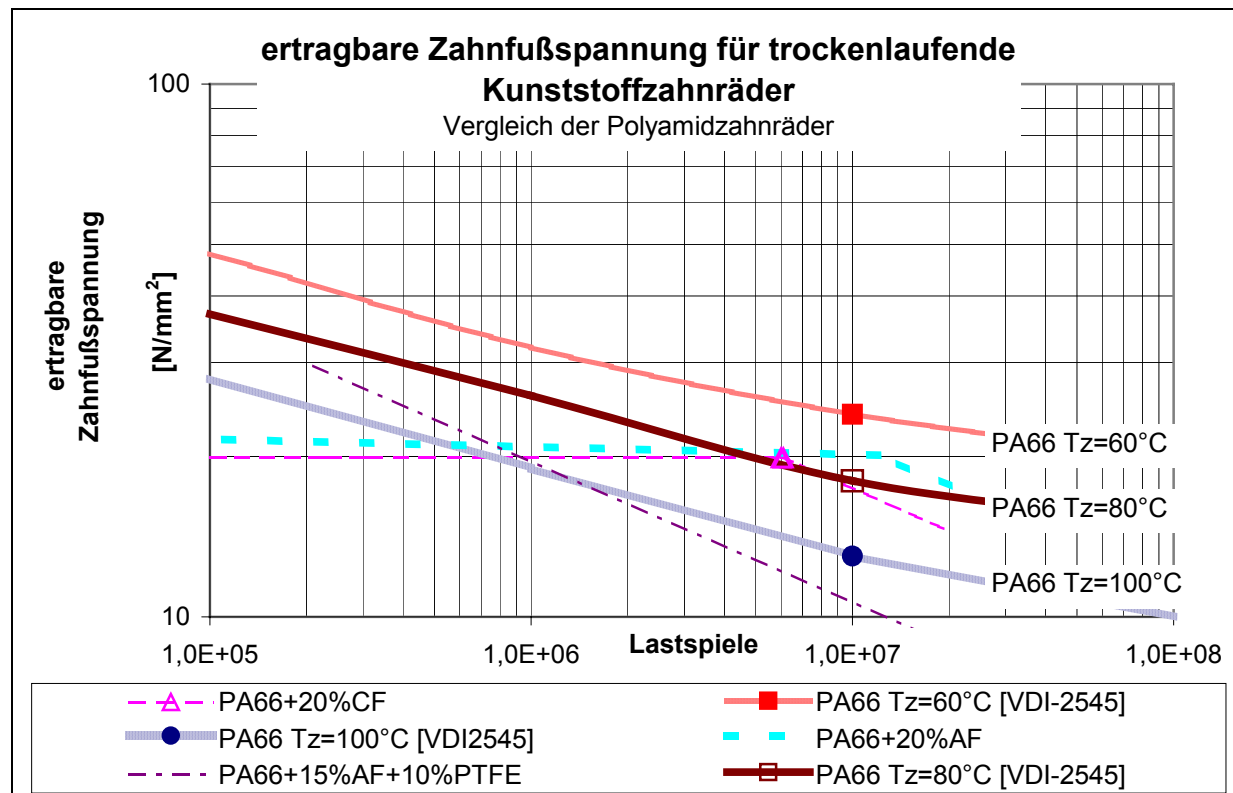


Abb. 77: Vergleich der ermittelten ertragbaren Zahnfußspannungen mit den Werten nach [VDI-2545] bei Polyamid

Abb. 78 zeigt, dass die ertragbaren Spannungen für modifiziertes POM weit unterhalb der in der VDI Richtlinie genannten Kennwerte liegen. Gleiches stellte bereits HEYM [Heym-97] in seinen Untersuchungen fest. Er konnte für das in der VDI Richtlinie genannte POM nicht die genannten zulässigen Spannungen ermitteln. Als Ursache für diese starke Abweichung wurde vermutet, dass in der VDI Richtlinie die zulässigen Werte aus Dauerversuchen an ungekerbten Proben mit schwellender Biegung abgeleitet wurden. Sie stellen damit keine bauteil- und systemspezifischen Werte dar.

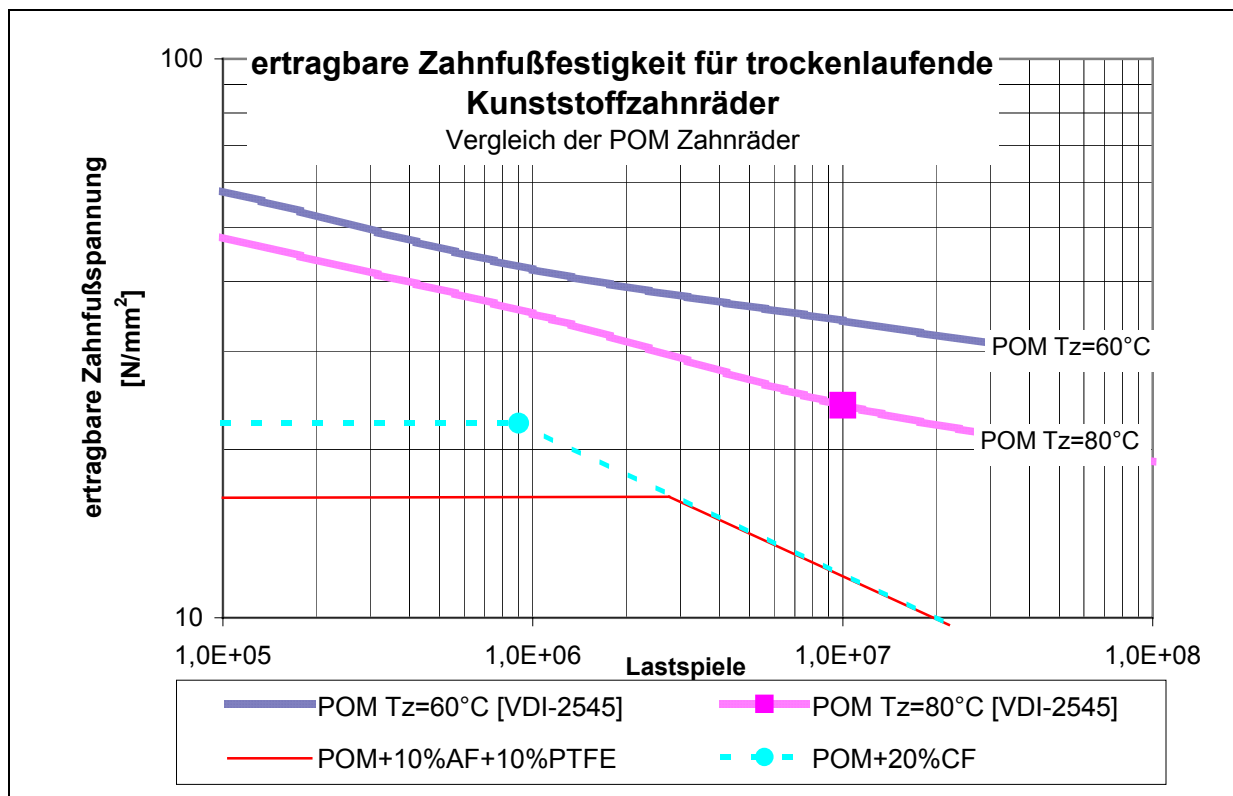


Abb. 78: Vergleich der ermittelten Zahnfußspannungen mit [VDI-2545] bei POM

7.2 Zahnflankenpressung

Aus Abb. 79 ist erkennbar, dass die ermittelten Grenzflächenpressungen für die Werkstoffe aus PEEK deutlich höher sind als die in der VDI-Richtlinie 2545 angegebenen Werte für Zahnräder aus PA66. Besonders hohe Grenzflächenpressungen wurden mit PEEK CA30 erreicht, obwohl bei diesem Werkstoff nur kleine Grübchen festgestellt wurden. Die Kohlenstofffasern erhöhen somit bei dem Grundwerkstoff PEEK die Flankentragfähigkeit deutlich.

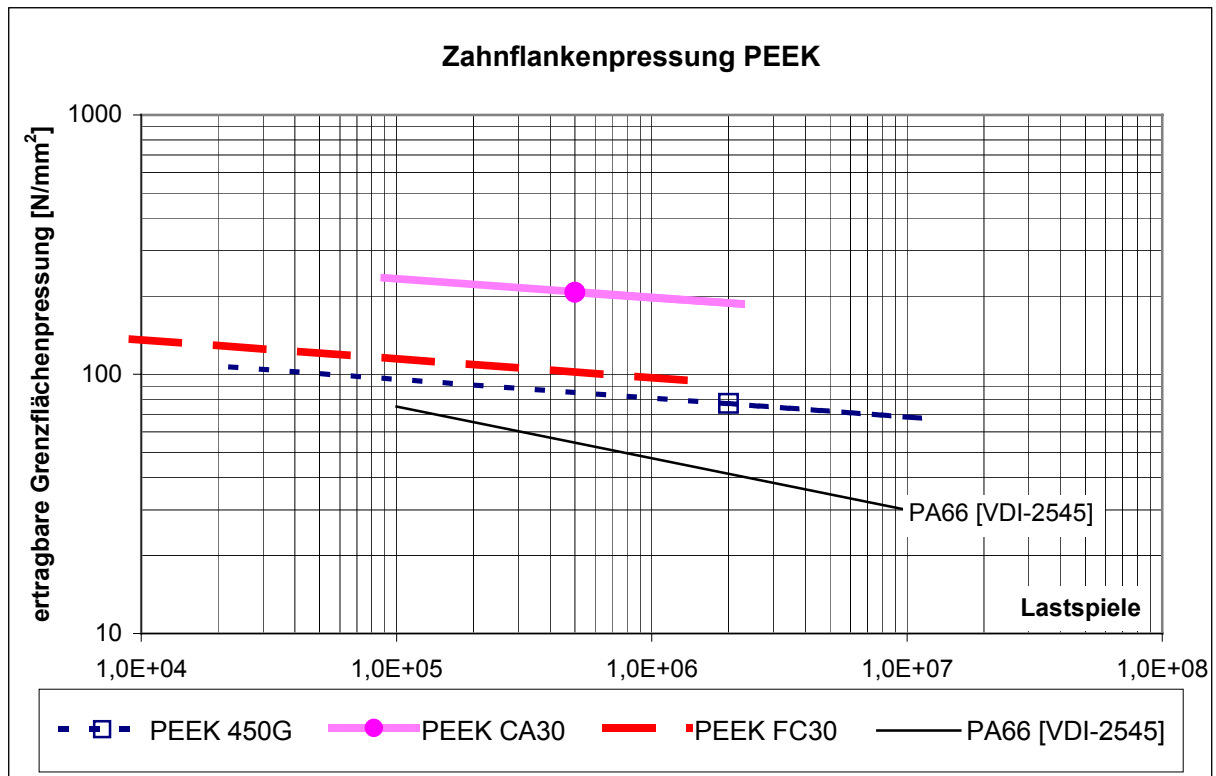


Abb. 79: Vergleich der ertragbaren Grenzflächenpressungen für ölgeschmierte Zahnräder bei einer Öltemperatur von 120°C

7.3 Belastungskennwerte

Trockenlaufende Zahnräder

Da die Lebensdauerergebnisse bei Kunststoffzahnradern stark von den Maschinen- und Umgebungsbedingungen abhängen, ist eine hinreichend genaue Aussage nur bei sehr ähnlichen Betriebsbedingungen möglich.

Nach der VDI Richtlinie 2545 [VDI-2545] kann mit dem so genannten Belastungskennwert $c = \frac{F_t}{b \cdot m \cdot \pi}$ die Tragfähigkeit der Kunststoffzahnäder abgeschätzt werden.

Ein Vergleich der Prüfmaschinencharakteristik der hier verwendeten Prüfmaschinen mit den von TICONA benutzten Prüfmaschinen wurde bereits von HEYM [Heym-97] erstellt. In Heyms Arbeit wurden die gleichen Prüfmaschinen verwendet wie in der vorliegenden Arbeit. Er stellte gegenüber den Ergebnissen von der VDI-Richtlinie 2545 [VDI-2545] und TICONA [Tic-99] fest, dass seine Kurven einen steileren Kurvenverlauf haben als die Vergleichskurven der genannten Quellen. Als Ursache wurde die unterschiedliche Prüfmaschinencharakteristik vermutet. Dies kann z.B.

eine höhere Maschinentemperatur bei gleichen Bedingungen bedeuten. Genaue Angaben sind bei HEYM nicht zu finden.

Einen Vergleich der Belastungskennwerte mit den Ergebnissen von TICONA [Tic-97] zeigt Abb. 80. Die von TICONA genannten Werte wurden mit ermittelten Werten der 10%igen Ausfallwahrscheinlichkeit verglichen.

Die ermittelten Belastungskennwerte liegen bis zur Anschmelzgrenze in dem Bereich des unmodifizierten C2521. Die von TICONA genannten Belastungskennwerte für das mit Spezialkreide modifizierte C9021K werden von den untersuchten Werkstoffen nicht erreicht.

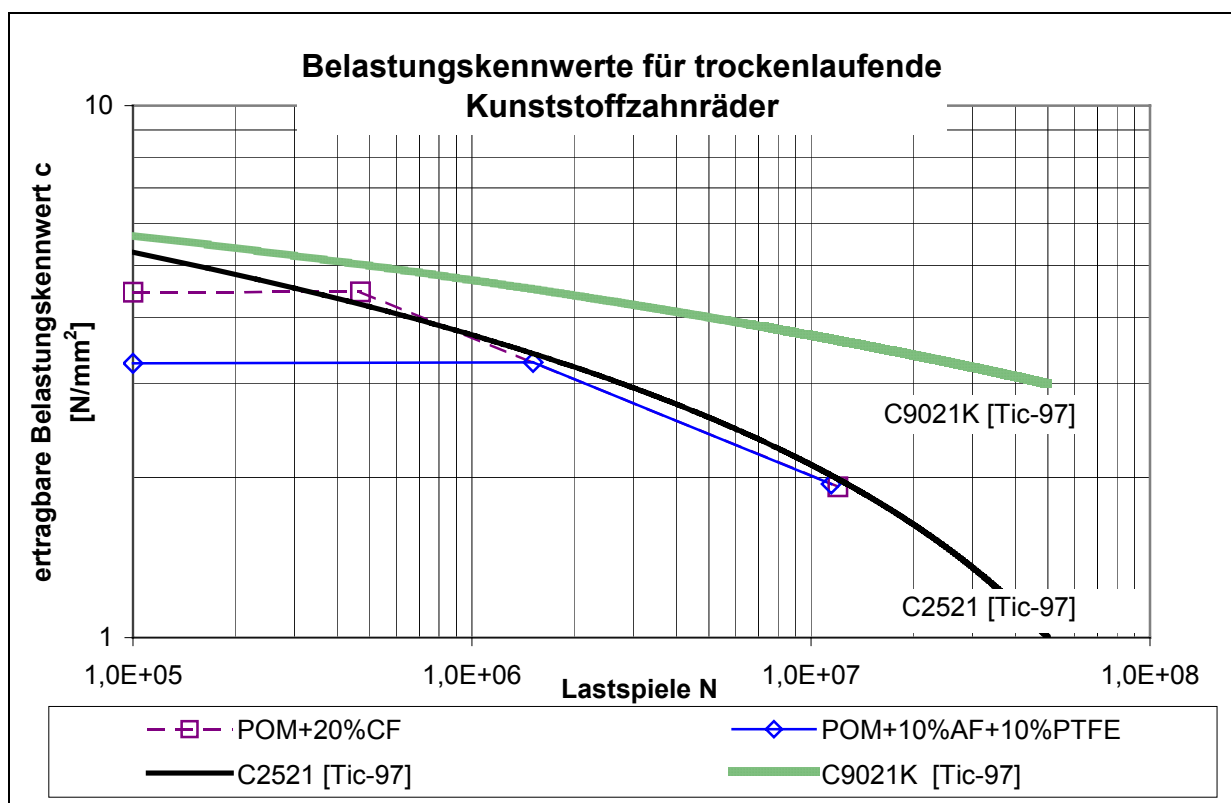


Abb. 80: Vergleich der Belastungskennwerte von trockenlaufenden POM Zahnradern

Bei den Polyamiden zeigen sich überwiegend deutlich höhere Tragfähigkeiten gegenüber denen in der VDI Richtlinie genannten PA12 (Abb. 81).

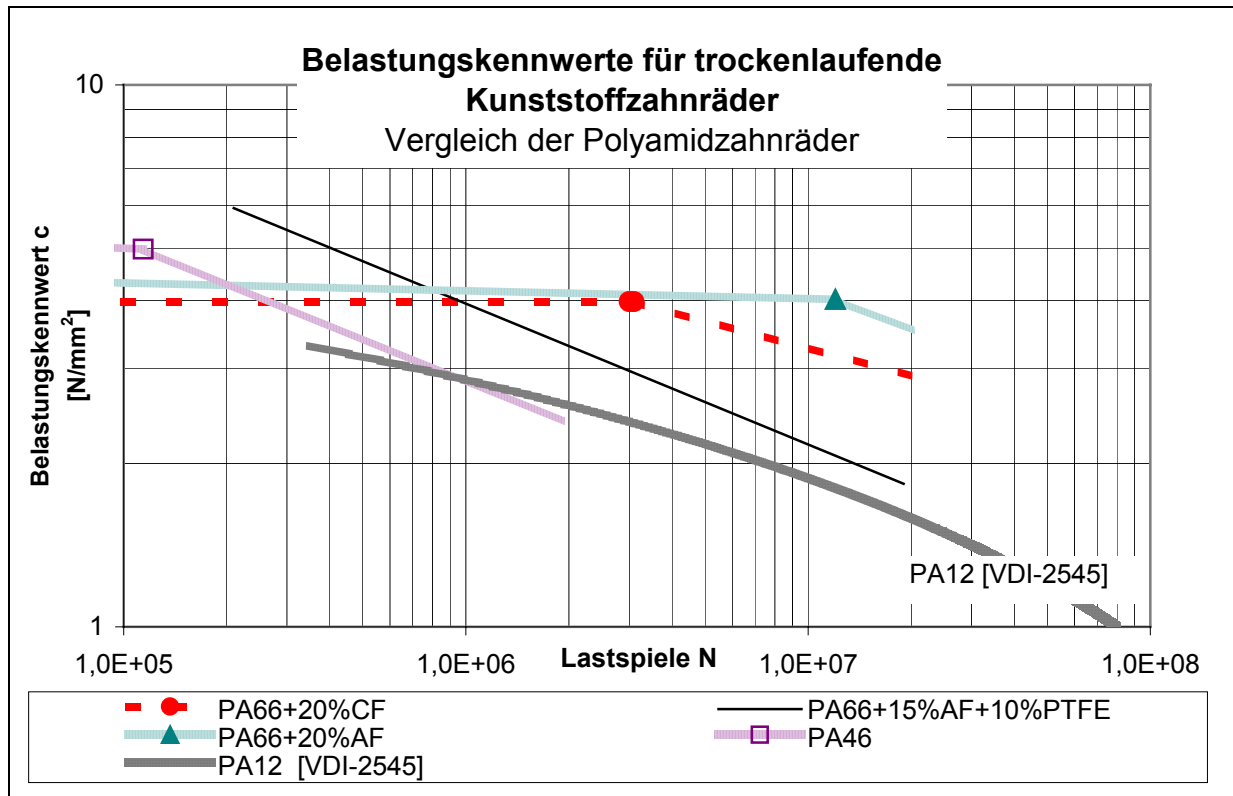


Abb. 81: Vergleich der Belastungskennwerte von trockenlaufenden Polyamidzahnrädern

Ölgeschmierte Kunststoffzahnräder

Da für Ölttemperaturen von 120°C keine vergleichbaren Belastungskennwerte zur Verfügung stehen, wurden die ermittelten Werte hier mit den Belastungskennwerten von 60°C und 90°C Ölttemperature verglichen. Dabei zeigt sich, dass PEEK CA30 auch dem PA12+GF trotz deutlich geringerer Temperatur überlegen ist (Abb. 82). Dies liegt an dem für PEEK Werkstoffe spezifischen geringen Festigkeitsabfall bei diesen Temperaturen.

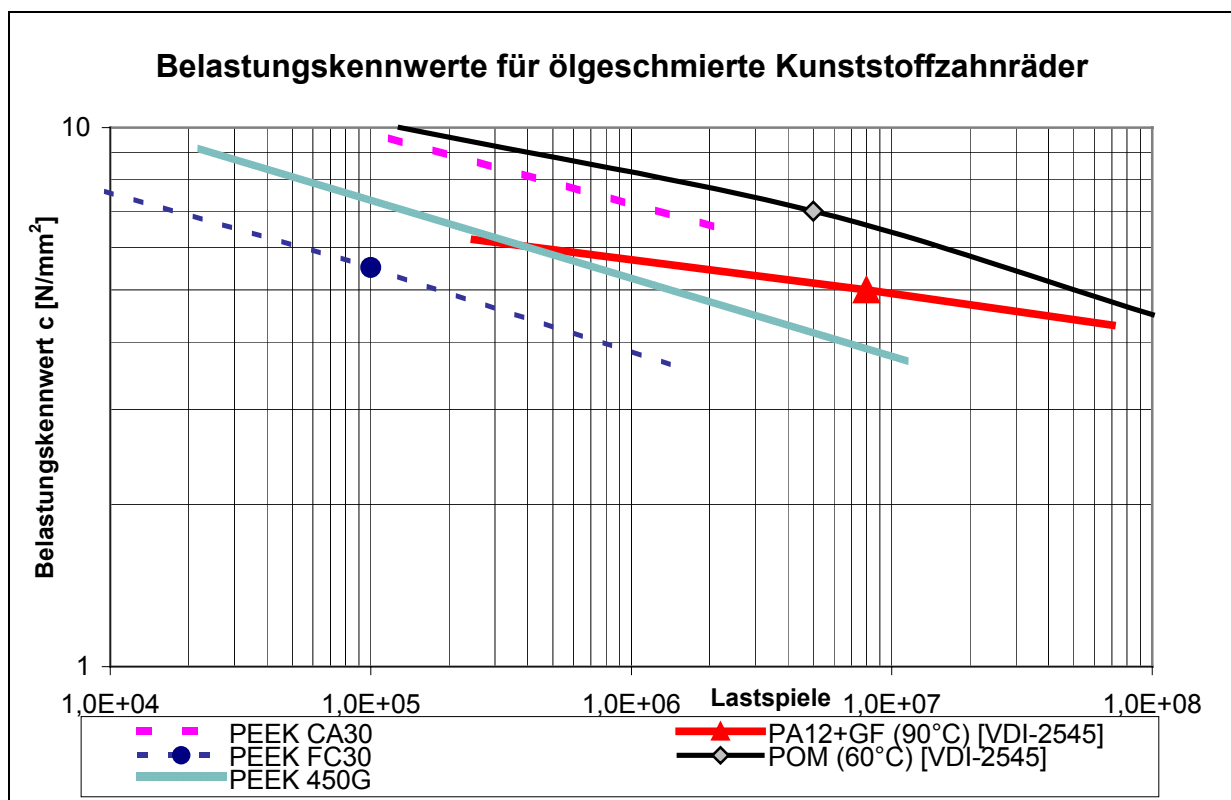


Abb. 82: Vergleich der Belastungskennwerte von ölgeschmierten Kunststoffzahnradern (Ölttemperature)

8 Anwendungshinweise

In diesem Kapitel werden einige konstruktive Schlussfolgerungen vorgestellt. Somit soll die Auswahl und die Beurteilung der Kunststoffe als Zahnradwerkstoff erleichtert werden. Eine einfache Übersicht der Anwendungshinweise ist Tab. 16 zu entnehmen.

Allgemeines

Generell ist der jeweilige Einsatzfall vor der Kunststoffauswahl genau zu betrachten.

Bei Getrieben mit erhöhten Zahnmasse-temperaturen sind die erhöhten Wärmedehnungen des Kunststoffes zu beachten. Das tritt unter anderem bei erhöhten Umgebungstemperaturen auf. Der Ausgleich kann über negative Profilverschiebung oder über vergrößerten Achsabstand realisiert werden.

Vor der Auswahl des Werkstoffes sollte die Belastung und die erforderliche Lastspielzahl abgeschätzt werden. Die Belastungsabschätzung kann im ersten Schritt über den Belastungsfaktor c (siehe Kap. 7.3) erfolgen.

Im nächsten Schritt ist die thermische Belastung, die Zahnmasse-temperatur, anhand der Temperaturformel von HACHMANN und STRICKLE [HaSt-66] (siehe Anhang A.1.3) abzuschätzen.

Bei der Verwendung von faserverstärkten Kunststoffen ist auf eine beanspruchungsgerechte Orientierung der Fasern zu achten (siehe Kap. 3.3). Wird dies nicht beachtet, so können sich die Fasern wie Kerben festigkeitsmindernd auswirken.

Aufgrund der sehr komplexen Problematik empfiehlt sich trotz Berechnung stets der Bau von Prototypen. Diese sollten möglichst realitätsnah getestet werden. Einen Ansatz zur Reduzierung des Versuchsaufwandes bilden die in dieser Arbeit vorgeschlagenen normierten Wöhlerlinien für Kunststoffzahnräder.

Trockenlaufende Kunststoffzahnräder

Tragfähigkeit

Hierbei ist zu unterscheiden, ob eine kurzzeitige hohe Last oder bei mittleren und geringen Lasten hohe Lastspielzahlen erreicht werden sollen.

Wird bei einer trockenlaufenden Paarung eine hohe Last mit geringen Lastspielzahlen angestrebt, so ist ein Werkstoff mit hoher Anschmelzlast zu wählen.

D.h. er sollte einen geringen Reibungskoeffizienten und/oder eine hohe Schmelztemperatur aufweisen. Dies wäre vorzugsweise die Paarung PA66+15%AF+10%PTFE/Stahl oder PEEK FC30/Stahl. Die Höhe der Anschmelzlast lässt sich sehr schnell in Hochlastversuchen feststellen.

Aufgrund der sehr guten Laufergebnisse mit spritzgegossenen PA66+20%AF/Stahl empfiehlt sich diese Paarung besonders für den trockenlaufenden Betrieb und bei Einbaufettschmierung im mittleren und hohen Lastspielzahlen, wobei darauf zu achten ist, dass aufgrund der geringeren Schlagzähigkeit keine sehr unruhig laufenden Getriebe vorliegen. In diesem Fall empfiehlt sich aufgrund der höheren Schlagzähigkeit eher die Paarung POM/Stahl.

Verschleiß

Die Höhe des zu erwartenden Verschleißes ist auch wesentlich von der Werkstoffauswahl abhängig. Ist ein Werkstoff mit geringem Verschleiß gefragt, so empfiehlt sich unverstärktes POM. Dies weist deutlich geringeren Verschleiß, als PA66 auf. Bei PA66 können durch die Zugabe von 20%Aramidfasern sehr gute Verschleiß Eigenschaften erreicht werden.

Kriechverformung

Für Getriebe mit einem präzisen Übertragungsverhalten ist eine geringe Kriechverformung wichtig. Bei den Untersuchungen zeigte sich, dass bei PA66 die Zugabe von Verstärkungsfasern die Kriechverformung reduziert. Die geringsten Kriechverformungen der untersuchten Werkstoffe wiesen die Zahnräder aus PA66+20%CF auf. Sie empfehlen sich damit für solche Anwendungen.

Wirkungsgrad

Für trockenlaufende Kunststoffgetriebe mit geringen Verlusten bietet sich als Zahnradwerkstoff POM bzw. POM+10%AF+10%PTFE oder PA66+15%AF+10%PTFE an. Bei den beiden letzten ist die Faserorientierung zu beachten.

Eine weitere einfache Möglichkeit, um den Wirkungsgrad deutlich zu erhöhen ist eine Einmalfettschmierung. Dazu empfiehlt sich POM als Zahnradwerkstoff. Der Wirkungsgrad kann damit von $\eta = 94 - 96,5\%$ auf $\eta = 98 - 99\%$ erhöht werden (siehe Kap. 4.2).

Geräusch

Da sich bei einem trockenlaufenden Kunststoffgetriebe über der Laufzeit der Geräuschpegel deutlich erhöht, sollten sich die Geräuschuntersuchungen über die gesamte Lebenszeit des Kunststoffgetriebes erstrecken. Der Geräuschpegel verläuft

asymptotisch zur Drehzahl. Zur Geräuschreduzierung sollte diese Kennlinie aufgenommen werden, um dann zu entscheiden wie viel Geräuschreduzierung möglich ist.

Eine Zuordnung von Last zu Geräuschpegel, wie z.B. je höher die Last umso stärker sind die Geräusche, ist nicht möglich.

	PEEK FC30	PA66	PA66+ 20%CF	PA66+ 20%AF	PA66+ 15%AF+ 10%PTFE	POM	POM+ 20%CF	POM+ 10%AF+ 10%PTFE	PA46
hohe Anschmelz- last	↑	↓	↘	→	↑	↘	→	↘	↗
hohe Lastspiele	→	-	↗	↑	↘	→	→	→	↓
hoher Wirkungs- grad	-	↓	→	→	↗	↗	↗	↑	-
geringe Kriech- verformung	-	→	↑	↗	↗	→	→	→	-
geringer Verschleiß	-	→	↘	↑	↗	↑	→	→	-
<div> <div>↑</div> <div>sehr gut</div> </div> <div> <div>↗</div> <div>gut</div> </div> <div> <div>→</div> <div>mäßig</div> </div> <div> <div>↘</div> <div>schlecht</div> </div> <div> <div>↓</div> <div>sehr schlecht</div> </div>									

Tab. 16: Übersicht der Zahnradeigenschaften der untersuchten Kunststoffe für trockenlaufende Kunststoff/Stahlgetriebe (- keine Angabe möglich)

Ölgeschmierte Kunststoffzahnräder

Bei ölgeschmierten Zahnradern kann auf den Zusatz von reibungsmindernden Zusätzen aufgrund der Schmierwirkung des Öles verzichtet werden. Unter erhöhten Temperaturen empfiehlt sich das PEEK CA30 und PEEK 450G.

9 Zusammenfassung und Ausblick

9.1 Zusammenfassung

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden hochbelastete Zahnräder aus Thermoplasten im trockenlaufenden und geschmierten Betrieb untersucht. Gegenstand der Betrachtungen war die Paarung Kunststoff/Stahl. Als Ziele der Untersuchungen erfolgten Lebensdauer-, Verschleiß-, Wirkungsgrad- und Geräuschermittlungen. Die zu untersuchenden Thermoplaste und Füllstoffe wurden anhand einer Analyse der bisherigen Untersuchungsergebnisse zu Kunststoffzahnradern unter Berücksichtigung von Kunststoffkennwerten ausgewählt. Dabei zeigte sich, dass die daraus abgeleitete Methode zur Vorauswahl geeigneter Kunststoffe für trockenlaufende Kunststoffzahnräder über Reibungskoeffizient, Verschleißfaktor und Biegefestigkeit sehr hilfreich ist, aber aufgrund der Komplexität nicht immer zum Erfolg führt.

Für trockenlaufende Kunststoffzahnräder wurden Möglichkeiten zur Steigerung der Tragfähigkeit (übertragbaren Leistung) und des Wirkungsgrades (geringere Übertragungsverluste) sowie zur Reduzierung des Verschleißes aufgezeigt. Bei ölgeschmierten Kunststoffgetrieben konnten bei erhöhten Temperaturen (120°C Öltemperatur) deutlich höhere Tragfähigkeiten gegenüber bisherigen Kunststoffen erreicht werden.

In der trockenlaufenden Paarung Kunststoff/Stahl zeigten sich hohe Belastbarkeiten bei spritzgegossenem und aramidfaserverstärktem Polyamid 66. Die Belastbarkeit ist höher als bei POM (dem bisherigen Standardwerkstoff für Kunststoffzahnräder) unter gleichen Prüfbedingungen. Dabei zeigte sich deutlich, dass die Belastbarkeit von der Faserorientierung abhängt.

Eine weitere Steigerung der Belastbarkeit wird durch Zugabe reibungsmindernder Zusätze erwartet. Diese Zusätze sind so zu wählen, dass die negativen Auswirkungen auf die mechanischen Eigenschaften gering sind. So zeigte sich bei einer zusätzlichen Anwendung von PTFE nur im Hochlastbereich eine Verbesserung der Zeitfestigkeit durch ein Wegfallen der Anschmelzgrenzen. Aufgrund der verringerten mechanischen Festigkeiten zeigten sich im mittleren und hohen Lastspielbereich geringere Tragfähigkeiten gegenüber PA66+20%AF. Ein besserer reibungsmindernder Zusatzstoff als PTFE wäre beispielsweise Silikon. Weiterhin

zeigte sich, dass PTFE die Flankentragfähigkeit herabsetzt und zur Grübchenbildung führt. Als Ursache wird ein verringerter Werkstoffzusammenhalt vermutet.

Deutliche Tragfähigkeitsteigerungen wies PA66 durch die Kohlenstofffaserverstärkung auf. Auch hier lagen die Lebensdauerkenwerte deutlich über denen des bisherigen Standardkunststoffes POM. Dagegen zeigten sich bei POM nicht so deutliche Tragfähigkeitsteigerungen durch die Kohlenstofffaserverstärkung.

Deutliche Verbesserungen im Verschleiß- und Wirkungsgradverhalten konnten bei PA66 durch die gewählten Füll- und Verstärkungsstoffe erreicht werden. Dagegen stellten sich bei POM keine deutlichen Verbesserungen ein.

Bei Polyamid 46 zeigte sich wegen des hohen Reibungskoeffizienten trotz hoher Temperaturbeständigkeit keine höhere Belastbarkeit gegenüber POM. Tragfähigkeitssteigerungen wären hier eventuell durch eine Zugabe reibungsmindernder Zusätze oder von Aramidfasern möglich. Zahnräder aus spritzgegossenem PEEK FC30 zeigten bei mittleren und hohen Lastspielzahlen ähnliche Belastungskennwerte wie POM. Im Hochlastbereich war PEEK FC30 dem POM überlegen. Dort, wo POM bereits durch Anschmelzungen versagt, besitzt PEEK FC30 noch eine gewisse Zeitfestigkeit. Dies liegt an der hohen Schmelztemperatur und an dem geringeren Reibungskoeffizienten.

Die relativen Geräuschmessungen zeigten eine Steigerung des Pegels von Versuchsbeginn bis zum Versagen der Zahnräder um zirka 20dB. Messungen bei verschiedenen Lasten zeigten keinen eindeutigen Zusammenhang zwischen Last und Geräuschpegel. Dagegen wurde eine nahezu asymptotische Steigerung des Geräuschpegels in Abhängigkeit von der Drehzahl nachgewiesen.

Weiterhin wurden Zahnräder aus dem Hochtemperaturthermoplast PEEK bei Ölschmierung und erhöhten Temperaturen untersucht. Es zeigte sich dabei eine deutliche Erhöhung der Tragfähigkeit gegenüber dem Trockenlauf. Sogar die Tragfähigkeit trockenlaufender Zahnräder aus PEEK bei Raumtemperaturen ist geringer als die vorgestellten Tragfähigkeiten für die ölgeschmierten Zahnräder bei 120°C. Hauptsächliche Ausfallursache bei den untersuchten Kunststoffen war Zahnfußbruch in der aktiven Flanke. Weiterhin wiesen die ölgeschmierten Zahnräder eine starke Grübchenbildung über die gesamte Flanke auf. Die besten Zeitfestigkeitswerte konnten mit kohlenstofffaserverstärkten PEEK CA30 erzielt werden. Die Zahnräder aus PEEK FC30 zeigten dagegen im gesamten Lastbereich

bei Faserverstärkung mit inkorporiertem Schmierstoff geringere Tragfähigkeiten als das unverstärkte PEEK 450G. Beginnend mit höchsten den Tragfähigkeiten lässt sich eindeutig die Reihenfolge PEEK CA30, PEEK 450G und PEEK FC30 darstellen.

Bei allen drei untersuchten PEEK Werkstoffen zeigte sich keine Kriechverformung der Zähne.

Die Versuchsergebnisse zeigen, dass PEEK CA30 und PEEK 450G bei Ölschmierung und 120°C als Zahnradwerkstoff in belasteten Getrieben eingesetzt werden können. Der Einsatz von Kunststoffzahnradern bei diesen Temperaturen war mit den bisher eingesetzten Kunststoffen nicht möglich.

Zur Reduzierung des Versuchsaufwandes bei Kunststoffzahnradern wurde ein Ansatz zur Normierung der Wöhlerlinien vorgestellt.

9.2 Ausblick

Bei der trockenlaufenden Paarung Kunststoff/Stahl ist PA66 mit Aramidfasern und zusätzlichen reibungsmindernden Zusätzen näher zu untersuchen. Durch die Zusätze kann eine Verringerung der Zahnmasse-temperatur erwartet werden, wodurch eine Erhöhung der Anschmelzlast abzusehen ist. Zu beachten ist dabei, dass keine Zusätze verwendet werden, welche die mechanischen Eigenschaften deutlich verschlechtern (z.B. PTFE). Ein geeigneter Zusatzstoff wäre beispielsweise Silikon. Weiterhin sind vertiefende Untersuchungen mit spritzgegossenem PA66+20%AF bei Einbaufettschmierung zu empfehlen (siehe [RöTe-00]). In Stichversuchen zeigten sich deutliche Steigerungen der Tragfähigkeiten gegenüber den trockenlaufenden Zahnradern aus PA66+20%AF.

Bei Zahnradern aus PA46 könnte die Zugabe von Aramidfasern zu Tragfähigkeitssteigerungen führen.

Bei den ölgeschmierten Zahnradern empfehlen sich Untersuchungen mit PEEK und PEEK CA30 bei Temperaturen über 120°C. Dadurch könnten die Einsatzpotentiale dieser Hochtemperaturthermoplaste gegenüber gebräuchlichen technischen Thermoplasten weiter verdeutlicht werden.

Weiterführende Untersuchungen sind vor allem mit PEEK CA30 durchzuführen. Da bei diesem relativ steifen Kunststoff ein größerer Einfluss der Verzahnungsqualitäten als bei anderen Thermoplasten möglich ist, sollten die Untersuchungen mit höheren Verzahnungsqualitäten durchgeführt werden.

Aufgrund der Grübchenbildung bei PEEK 450G in der Paarung mit einem Stahlritzel sollte auch die Paarung Kunststoff/Kunststoff untersucht werden. Hierbei empfiehlt sich PEEK CA30 aufgrund seiner höheren Tragfähigkeiten als Ritzelwerkstoff und PEEK 450G als Radwerkstoff.

10 Quellenverzeichnis

- [Baum-92] Baumgart, J.: Untersuchung zur Optimierung von Kunststoff/Stahl – Zahnradpaarungen, Diss. TU Berlin 1992
- [BeSi-73] Beitz, W.; Siedke, E.: Einsatz von Kunststoffzahnradern im Maschinenbau, VDI-Berichte Nr. 195 (1973) S. 245 - 251
- [BeSi-72] Beitz, W.; Siedke, E.: Untersuchungen an Zahnradern aus PA12, Kunststoffe Bd. 62 (1972) 6 S. 390 - 393
- [Budi-69] Budich, W.: Beitrag zur Untersuchung öl- und fettgeschmierter geradverzahnter Stirnräder aus Acetalcopolymerisat, Diss. TU Berlin 1969
- [Centr-97] telefonische Information der Firma Centroplast, 1997
- [CoBu-70] Cornelius, E.-A.; Budich, W.: Untersuchungen an Zahnradern aus Acetalharzen, Konstruktion 22 (1970) 3, S.103 -116
- [CrDa-92] Crippa G.; Davoli P.: Comparative Fatigue Resistance of Fiber Reinforced Nylon 6 Gears; ASME International Power Transmission and Gearing Conference - Volume 2; ASME 1992; New York S. 651 - 659
- [CrDa-93] Crippa G.; Davoli P.; Tonti S.: Zahnkupplungen für Dieselmotoren, München Carl Hanser Verlag Kunststoffe 83 (1993) 3 S. 221 - 225
- [DaCo-94] Davoli, P.; Gorla, C.: Methods for Plastic Gears Rating: Review and Discussion, International Gearing Conference, Newcastle, Sept. 1994, London S. 7 - 12
- [Den-75] Dengel, D.: Die $\arcsin \sqrt{P}$ -Transformation – ein einfaches Verfahren zur grafischen und rechnerischen Auswertung geplanter Wöhlerversuche, Zeitschrift für Werkstofftechnik, 6. Jahrgang, August 1975, H8, S. 253 - 288
- [Dubb-90] Dubbel; Taschenbuch für den Maschinenbau, 17. Auflage, Springer Verlag 1990
- [Eber-98] Ebert, K.: Entwicklungspotentiale an Kunststoffzahnradern zur Substitution von Stahlgetrieben im Bereich der Feinwerktechnik, Symposium „Neue Werkstoffe in Bayern“ 04 - 05.März 1998 in Bayreuth S.109 -133
- [EDEM-94] Eckhardt, V.; Dorf, S.; Kelly, W.; Matzner, M.; „Polaryetherketone“ in Technische Thermoplaste - Hochleistungs – Kunststoffe, Kunststoff Handbuch 3/3; München Hanser Verlag 1994
- [ErStr-72] Erhard, G.; Strickle, E.: Gleitelemente aus thermoplastischen Kunststoffen. Teil 1: Gleitreibverhalten im Trockenlauf, Kunststoffe, Bd. 62 (1972) 1, S. 2 - 9
- [FEE1-98] Faatz, P.; Ehrenstein, G. W.; Ebert, K. H.; Kunststoffzahnradern: Hybrid- contra DIN-Verzahnung, KEM, 7/1998 Juli S.70-71
- [FEE2-98] Faatz, P.; Ehrenstein, G. W.; Ebert, K. H.; Kunststoffzahnradern: Hybrid- contra DIN-Verzahnung. KEM 8/1998, Sept. S. 28 - 29
- [FIZiRo-96] Flemming, M.; Ziegmann, G.; Roth, S.; Faserverbundbauweisen, Halbzeuge und Bauweisen. Springer Verlag 1996
- [Haib-89] Haibach, E.; Betriebsfestigkeit, Verfahren und Methoden zur Bauteilberechnung; VDI Verlag 1989
- [HaSt-66] Hachmann, H.; Strickle, E.; Polyamide als Zahnradwerkstoffe,

- [HaSt-69] Konstruktion. 18 (1966) 3 S.81-94
- [HeBe-95] Hachmann, H.: Strickle, E.; Reibung und Verschleiß an der Gleitpaarung Polyamid/Stahl bei Trockenlauf. Kunststoffe (1969)
- [Heym-95] Heym, B.: Beitz, W.; Zur Belastbarkeit von Stirnzahnrädern aus dem Hochtemperatur-Thermoplast PEEK, Konstruktion 47 S. 351 - 357
- [Heym-95] Heym, B.: Hochtemperatur-Thermoplast-Zahnräder. Abschlußbericht zum FKM-Forschungsvorhaben 158. Heft 208 (1995)
- [Heym-97] Heym, B.: Tragfähigkeitsoptimierung trockenlaufender Kunststoff-Stahl-Zahnradpaarungen durch Einsatz von Verbundwerkstoffen und geometrischer Zahnkorrektur. Diss. TU Berlin 1997
- [Hoi-94] Hoischen, H.: Technisches Zeichnen. Cornelsen Verlag Berlin 1994
- [KeSc-86] Keuerleber R.; Schütt K.: Aramidfaserverstärkte Thermoplaste, Sonderdruck aus der Zeitschrift „Kunststoffe“ 76. Jahrgang; 1986; Heft 10
- [Kiss-98] Kissling, U.: Optimierung von Zahnrädern aus Kunststoff. Antriebstechnik 37 (1998) Nr.12 S.51 - 56
- [Klein-67] Klein, G.: Untersuchungen zur Tragfähigkeit und zum Verschleißverhalten von geradverzahnten Stirnrädern aus thermoplastischen Kunststoffen bei einer Radpaarung Stahl-Kunststoff, Diss. TU Berlin 1967
- [Kog-79] Kogler, H.-G.: Örtliche und mittlere Betriebstemperaturen an kleinen Kunststoffzahnradern, Reihe: Ingenieurwissen; Konstruktion, Fertigung und Anwendung feinwerktechnischer Kunststoffteile, S.137 -148; Düsseldorf, VDI Verlag 1976
- [Krau-85] Krause, W.: Plastzahnräder; VEB Verlag Technik Berlin, 1985
- [Linke-96] Linke, H.: Stirnradverzahnung, München, Hanser Verlag 1996
- [Mae-81] Maenning, W. W.: Entwicklung bei der Planung und Auswertung von Schwingfestigkeitsuntersuchungen, Vorträge der 6. Sitzung des Arbeitskreises Betriebsfestigkeit „Neuere Erkenntnisse und Verfahren der Schwingfestigkeitsforschung“, Deutscher Verband für Materialprüfung e.V. Berlin 1981, S. 103 - 131
- [Mart-87] Martini, J.: Untersuchung der Lebensdauer und Verlustleistung spritzgegossener Kunststoffzahnrad Diss. TU Berlin 1987
- [Meng-66] Menges, G.: Einsatz und Berechnung von Kunststoffzahnradern, Maschinenmarkt Jg.72 (1966) Nr. 34 S. 913 - 923
- [Mertens-03] Mertens, H.: Vorlesung Beanspruchungsgerechtes Konstruieren, TU-Berlin, 2003
- [NiOh-60] Niemann G.; Ohlendorf, H.: Verlustleistung und Erwärmung von Stirnradgetrieben. VDI-Z 102 (1960) Nr. 6, S. 216 - 224
- [NiWi-83] Niemann, G.: Winter H.; Maschinenelemente, Band II, Springer Verlag, 1983
- [Rems-65] Remshardt, F.: Vergleichende Untersuchungen des Lauf-, Verschleiß- und Formänderungsverhaltens ölgeschmierter Stirnräder aus thermoplastischen Kunststoffen. Diss. TU Berlin 1965

- [RoMa-94] Roloff/Matek: Maschinenelemente; 13. Überarbeitete Auflage; Vieweg Verlag, 1994, S. 598
- [RöTe-00] Rösler, J.; Tegel O.: Experimental Studis of Plastic Gears without Lubrication; Proceedings of DETC'00; 8th International ASME Power Transmission and Gearing Conferece; September 10-13, 2000, Baltimore, Maryland, DETC2000/PTG-14389
- [Sae-92] Saechtling, H.: Kunststoff Taschenbuch; Hanser Verlag; 25 Ausgabe 1992
- [She-79] Shelton J. A.: Zahnräder aus Thermoplasten; Antriebstechnik 18 1979, Nr. 9 S.437- 439
- [ScKo-79] Scholz, G.; Kogler, H.-G.: Untersuchungen zum Verschleiß von Zahnrädern aus Kunststoff. Maschinenmarkt, Würzburg, 85 (1979) S. 553 - 556
- [Sied-77] Siedke, E.: Tragfähigkeitsuntersuchungen an trockenlaufenden Zahnrädern aus thermoplastischen Kunststoffen Diss. TU Berlin 1977
- [TaSh-80] Takanashi, S.; Shoji, A.: On the Temperature Rise in the Teeth of Plastic Gears. Japan, ASME 80-C2/DET-107, (1980) p. 1-6
- [TeT3-86] Terashima, K.; Tsukamoto, N.: Developement of Plastic Gears for Power Transmission Bulletin of JSME, Vol. 29, No. 251 May (1986) S.1598 -1604
- [TMI-91-1] Tsukamoto, N.; Maruyama, H.; Ikuta, T.: A Study on Development of Low Noise Gears, JSME International Journal, Series 3 Vol. 34, Nr. 1 (1991) S. 114 - 120
- [TMI-91-2] Tsukamoto, N.; Maruyama, H.; Ikuta, T.: Development of Low-Noise Gears, JSME International Journal, Series 3 Vol. 34 No.2 (1991), S.245 - 251
- [Tsuk-95] Tsukamoto, N.; Argument on Plastic Gears for Power Transmission; JSME International Journal; Series C, Vol. 38, Nr. 1, 1995 S. 1-7
- [TMTN-91] Tsukamoto, N.; Maruyama H.; Taki T.; Nishida N.: A Study on Strength Design Methods for Plastic Gears; JSME International Journal Series III, Vol. 34, No 1; 1991 S. 121-126
- [UeWi-84] Uetz; Wiedemeyer: Tribologie der Polymere, Grundlagen und Anwendung in der Technik, Hanser Verlag 1984
- [Voß-87] Voß, H.: Verschleiß langfaserverstärkter Thermoplaste, Kunststoffe 77 (1987)
- [WaWhWe-99] Walton, D.; White, J.; Weale D.J.: Plastic gears- the state of the art; 4th World Congress on Gearing and Power Transmission, 1999, Paris
- [WHMBK-92] Walton, D.; Hooke, C. J.; Mao, K.; Breeds, A.; Kukureka, S.; A New Look at Testing and Rating non-metallic gears, Paris, Third World Congress on Gearing and Power Transmission 1992 S. 683 - 693
- [WhWaWe-98] Walton, D.; White, J.; Weale D. J.: Developments and advancements in plastic gearing technology, Conference Proceedings at ANTEC '98 Atlanta, 1998
- [Win-01] Winterfeld J.: Einflüsse der Reibdauerbeanspruchung auf die Tragfähigkeit von P4C-Welle-Nabe-Verbindungen, Diss. TU-Berlin, 2001

Normen und Richtlinien

- [DIN 867] Bezugsprofile für Evolventenverzahnungen an Stirnrädern für den allgemeinen Maschinenbau und den Schwermaschinenbau, 1986
- [DIN 3960] Begriffe und Bestimmungsgrößen für Stirnräder und Stirnradpaare mit Evolventenverzahnung, 1980
- [DIN 3962] Toleranzen für Stirnradverzahnungen: Toleranzen für Abweichungen einzelner Bestimmungsgrößen, 1978
- [DIN 3963] Toleranzen für Stirnradverzahnungen: Toleranzen für Wälzabweichungen, 1978
- [DIN 3972] Bezugsprofile von Verzahnwerkzeugen für Evolventen-Verzahnungen nach DIN 867, 1952
- [DIN 51354] Prüfung von Schmierstoffen, FZG Zahnrad-Verspannungs-Prüfstand
- [VDI-2545] VDI-Richtlinie 2545: Zahnräder aus thermoplastischen Kunststoffen VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf 1981 (zurückgezogen)
- [VDI-2608] VDI-Richtlinie 2608: Einflanken und Zweiflankenwälzprüfung von gerad- und schrägverzahnten Stirnrädern mit Evolventenprofil VDI Verlag GmbH, Düsseldorf 1975
- [VDI/VDE-2620] VDI/VDE 2620, Entwurf: Unsichere Messungen und ihre Wirkungen auf das Messergebnis. Berlin: Beuth, Dez. 1998

Firmenschriften

- [BASF-96] BASF: Reibung und Verschleiß bei Polymerwerkstoffen. Technische Informationen 4/96
- [Camp-98] Campus 4.1, Kunststoffdatenbank der Firmen: BAKELITE, BASF, BAYER, CRENOVA, DUPONT, HOECHST, HOSTALEN, HÜLS. 1998
- [Delr-00] tribologische Untersuchungen der Firma Dupont zum Werkstoff Delrin
- [Dupo-97] Dupont: Allgemeine Konstruktionsprinzipien für technische Kunststoffe von Dupont (Modul I) 1997
- [Kern-98] Kern Riweta: Kunststoffdatenbank der Kern GmbH; 1998
- [Lubr] Lubricomp: A Guide to LNP's Internally Lubricated Thermoplastics, Broschüre der Firma LNP Engineering Plastics
- [LNP] LNP-Engineering Plastics, Produktkatalog, (keine Jahresangabe)
- [SKF-89] Lagerkatalog der Firma SKF, 1989
- [Tic-97] TICONA: Technische Kunststoffe B1.1.1; Stirnradgetriebe mit Zahnrädern aus Hostaform, Celanex und Hostalen GUR; 1997, 6. Auflage
- [Tic-99] Hostaform X354, Informationsbroschüre von TICONA, 1999
- [Vic] Katalog des Werkstoffes PEEK von der Firma VICTREX, (keine Jahresangabe)

11 Anhang

A.1 Berechnung der Kunststoffzahnräder

Zur Berechnung der untersuchten Zahnäder wurden in diesem Kapitel die erforderlichen Formeln erläutert. Die Berechnungsrichtlinien für Kunststoffzahnädern sind aus der DIN-3990 für Stahlzahnäder abgeleitet und an die Besonderheiten von Kunststoffzahnäder angepasst.

A.1.1 Berechnung der Zahnfußtragfähigkeit

Die maximal am Zahnfuß auftretende Spannung σ_F ergibt sich aus:

$$\sigma_F = Y_\beta \cdot K_A \cdot Y_\varepsilon \cdot Y_F \cdot \frac{F_t}{b \cdot m} \quad (\text{A} - 1)$$

mit den für die vorliegenden Versuchen gültigen Parameter gilt:

$$\sigma_F = 0,796 \cdot \frac{F_t}{b} \quad (\text{A} - 2)$$

Der Verlauf der ermittelten Zahnfußspannungen ist aus Kap. 8.1 zu entnehmen.

Nach Abschätzung der auftretenden Zahnmassestemperatur ist nach [VDI-2545] eine

$$\text{Sicherheit } S_F = \frac{\sigma_{FN}}{\sigma_F} \geq 1,25 \text{ anzustreben.} \quad (\text{A} - 3)$$

A.1.2 Berechnung der Zahnflankentragfähigkeit

Die Bestimmung der Hertzschen Pressung hat für Kunststoffe wegen ihres geringen Elastizitätsmoduls und daraus resultierenden hohen Verformungen streng genommen keine Gültigkeit. Die zulässige Flankenpressung wird jedoch bauteilspezifisch an Prüfrädern auf die gleiche Weise ermittelt, daher ist die Anwendung der Hertzschen Beziehungen als Arbeitshypothese gerechtfertigt.

$$\sigma_H = Z_H \cdot Z_M \cdot Z_\varepsilon \cdot \sqrt{K_A \cdot \frac{u+1}{u} \cdot \frac{F_t}{d_t \cdot b}} \quad (\text{A} - 4)$$

Bei dem Wert für den Elastizitätsmodul ist die zuvor errechnete Flankentemperatur zu berücksichtigen.

Für die Kunststoffe, die im trockenlaufenden Betrieb untersucht wurden, liegen keine Werte für das E-Modul bei höheren Temperaturen vor. Daher kann die

Flankenpressung dafür nicht berechnet werden. Bei den ölgeschmierten Zahnrädern liegen dagegen Werte vor.

Werkstoff	E bei 120°C [N/mm ²]	E' [N/mm ²]	Z _M $\left[\sqrt{\text{N/mm}^2} \right]$
PEEK 450G	4000	7850	53
PEEK FC30	8000	15410	74,5
PEEK CA30	18600	34170	110

Tab. A1: Übersicht der Materialfaktoren Z_M für die ölgeschmierten Kunststoffzahnäder für die Paarung mit einem Stahlritzel bei 120°C

Mit den Konstanten für die vorliegenden Untersuchungen vereinfacht sich die Formel für die untersuchte Paarung zu:

$$\sigma_H = 0,266 \cdot Z_M \cdot \sqrt{\frac{F_t}{b}} \quad (\text{A} - 5)$$

Die in den vorliegenden Versuchen ermittelten Grenzflächenpressungen σ_{HN} sind Kap. 8.2 zu entnehmen.

Als ausreichende Sicherheit S_H wird nach [VDI-2545] empfohlen:

$$S_H = \frac{\sigma_{HN}}{\sigma_H} \geq 2 \quad (\text{A} - 6)$$

A.1.3 Berechnung der Zahnmassestemperatur

Ein Ansatz zur Abschätzung der Zahntemperatur wurde von HACHMAN und STRICKLE [HaSt-66] vorgestellt. Er beruht darauf, dass die im Eingriff entstehende Wärmemenge Q₁ gleich der Wärmemenge Q₂ ist, welche an den Getriebeinnenraum abgegeben wird. Diese wiederum entspricht der Wärmemenge Q₃ die vom Getriebegehäuse nach außen abgeführt wird.

$$Q_1 = P \cdot \mu \cdot \frac{u+1}{z_1 \cdot u \cdot \cos \beta} (1 - \epsilon_\alpha + \epsilon_1^2 + \epsilon_2^2) \quad \text{nach [NiWi-83]} \quad (\text{A} - 7)$$

Q₂ ist die vom Zahnrad in den Getriebeinnenraum abgegebene Wärmemenge:

$$Q_2 = k_1 \cdot m \cdot z_{1,2} \cdot b \cdot \alpha_W \cdot (T_{Z1,Z2} - T_i) \quad (\text{A} - 8)$$

Ein Ersatzmodell einer mit der Umfangsgeschwindigkeit v_t längs angeströmten ebenen Platte der Länge m·π dient der Bestimmung von α_W:

$$\alpha_w = \frac{1}{20} \cdot \frac{\lambda}{m} \cdot \left(\frac{v_t \cdot m}{a} \right)^{0,75} \quad (\text{A} - 9)$$

Die Wärmemenge, die vom Getriebegehäuse nach außen abgegeben wird berechnet sich:

$$Q_3 = A \cdot k_3 \cdot (T_i - T_u) \quad (\text{A} - 10)$$

Daraus ergibt sich die Abschätzungsformel für die Zahntemperatur

$$T_{Z1,Z2} = T_u + P \cdot \mu \cdot \frac{\pi \cdot (u+1)}{z_1 \cdot u} \cdot (1 - \varepsilon_\alpha + \varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2) \left[\frac{k_2}{2 \cdot b \cdot z_{1,2} \cdot \lambda \cdot \left(\frac{v_t \cdot m}{a} \right)^{0,75}} + \frac{k_3}{A} \right] \quad (\text{A} - 11)$$

Abbildungen A1 und A2 zeigen den Vergleich der errechneten Zahnmasse-temperaturen mit den tatsächlich gemessenen Werten. Die einzelnen Punkte zeigen die Messwerte und die Linien stellen die errechnete Werte dar. Es zeigt sich, dass mit den ermittelten Reibungskoeffizienten der Berechnungsansatz geeignet ist, um die Temperaturen abzuschätzen.

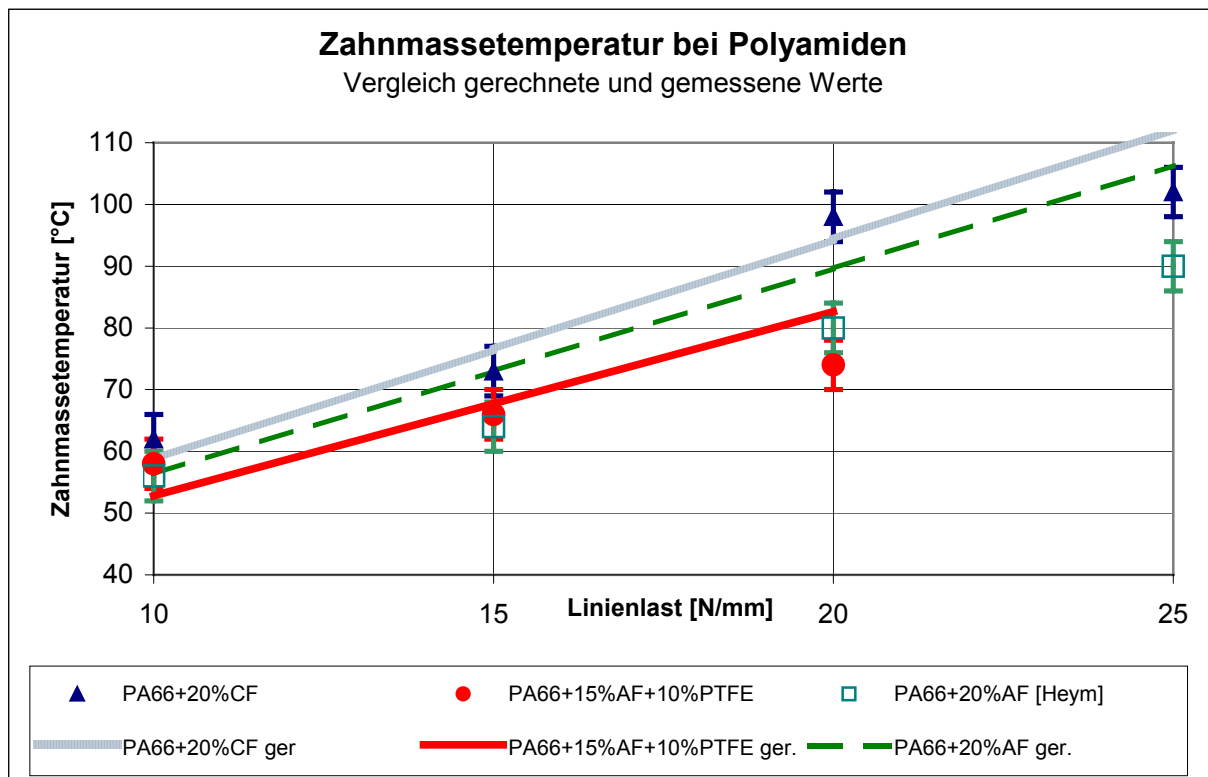


Abb. A1: Vergleich der gerechneten (ger.) und der gemessenen Zahnmasse-temperaturen bei den untersuchten trockenlaufenden Polyamiden

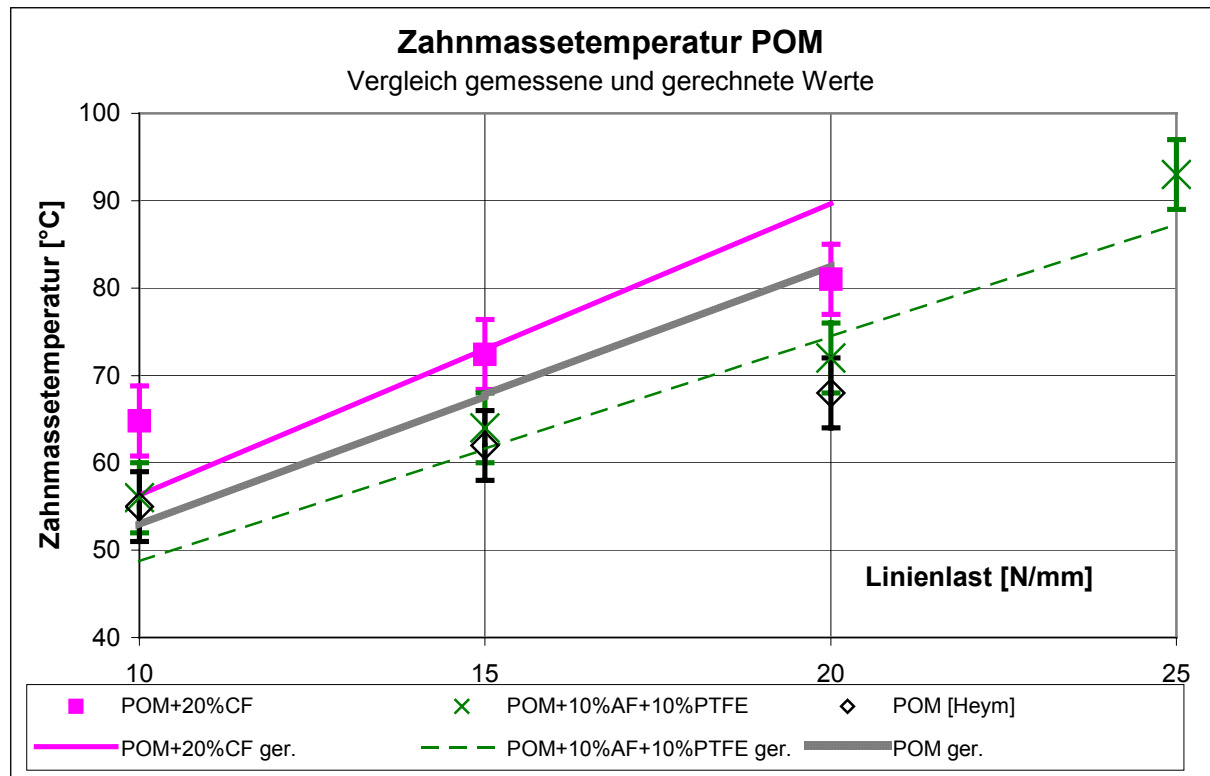


Abb. A2: Vergleich der gerechneten (ger.) und der gemessenen Zahnmasse­temperaturen bei den untersuchten trockenlaufenden POM

A.2 Übersicht der Werkstoffeigenschaften

Werkstoff	Zugfestig- keit [MPa]	Biege- festigkeit [MPa]	IZOD-Schlag- zähigkeit gekerbt [J/m]	Abrieb- faktor K	dyn. Reibungs- koeffizient
PA66	80	105	55	200	0,28
PA66+20%CF	215	300	90	20	0,2
PA66+20%AF	100	120	60	13	0,2
PA66+15%AF+ 10%PTFE	85	110	45	13	0,13
POM	70	100	55	65	0,21
POM+10%AF+ 10%PTFE	75	75	75	8	0,1
POM+15%CF*	150	180	70	50	0,14

Tab. 1A: Übersicht der Werkstoffeigenschaften der untersuchten Kunststoffe nach [LNP] (* für POM+20%CF sind keine Werkstoffangaben vorhanden, da es sich um ein Entwicklungsprodukt handelt)

Werkstoff	Zugfestigkeit [MPa]	Biegefestigkeit [MPa]
PEEK 450G	97	170
PEEK CA30	224	355
PEEK FC30	141	210

Tab. 2A: Übersicht der Werkstoffeigenschaften der untersuchten Kunststoffe nach [Vic]

A.3 Übersicht der ermittelten Kennwerte

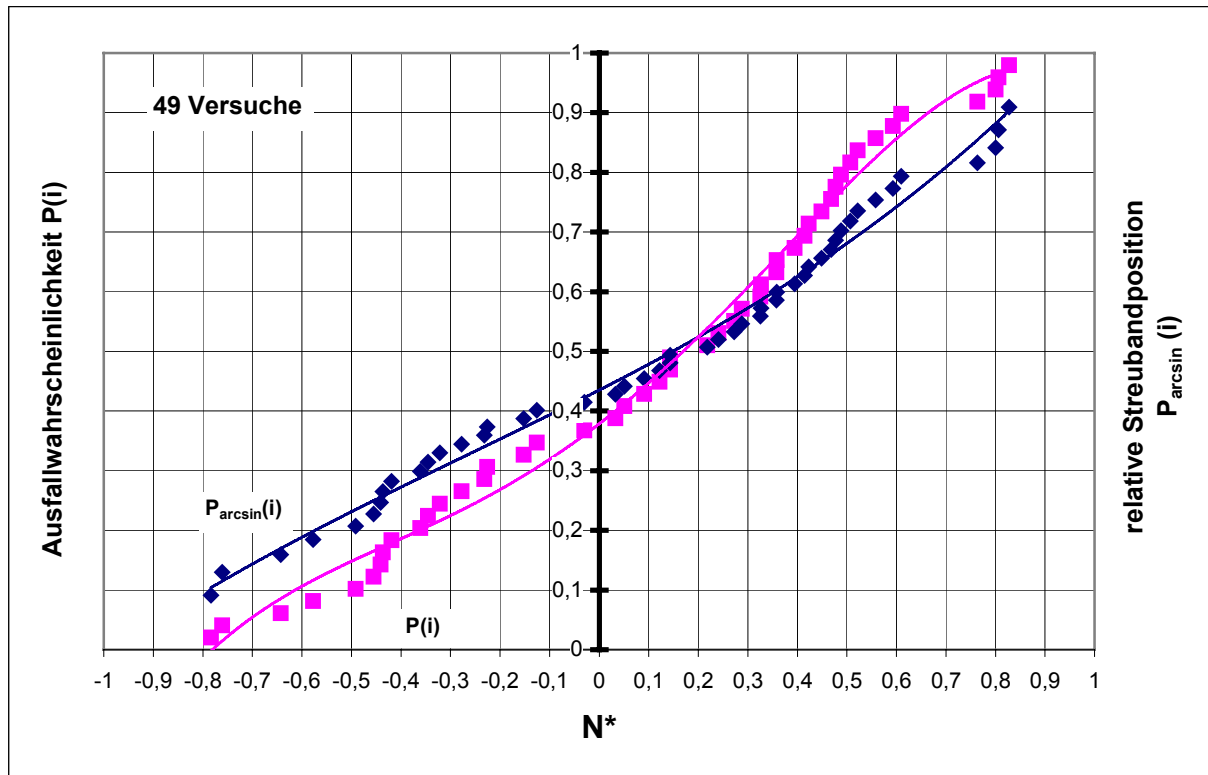


Abb. A3: Bestimmung der Ausfallwahrscheinlichkeit und der Streubandposition für ölgeschmierte Kunststoffzahnräder

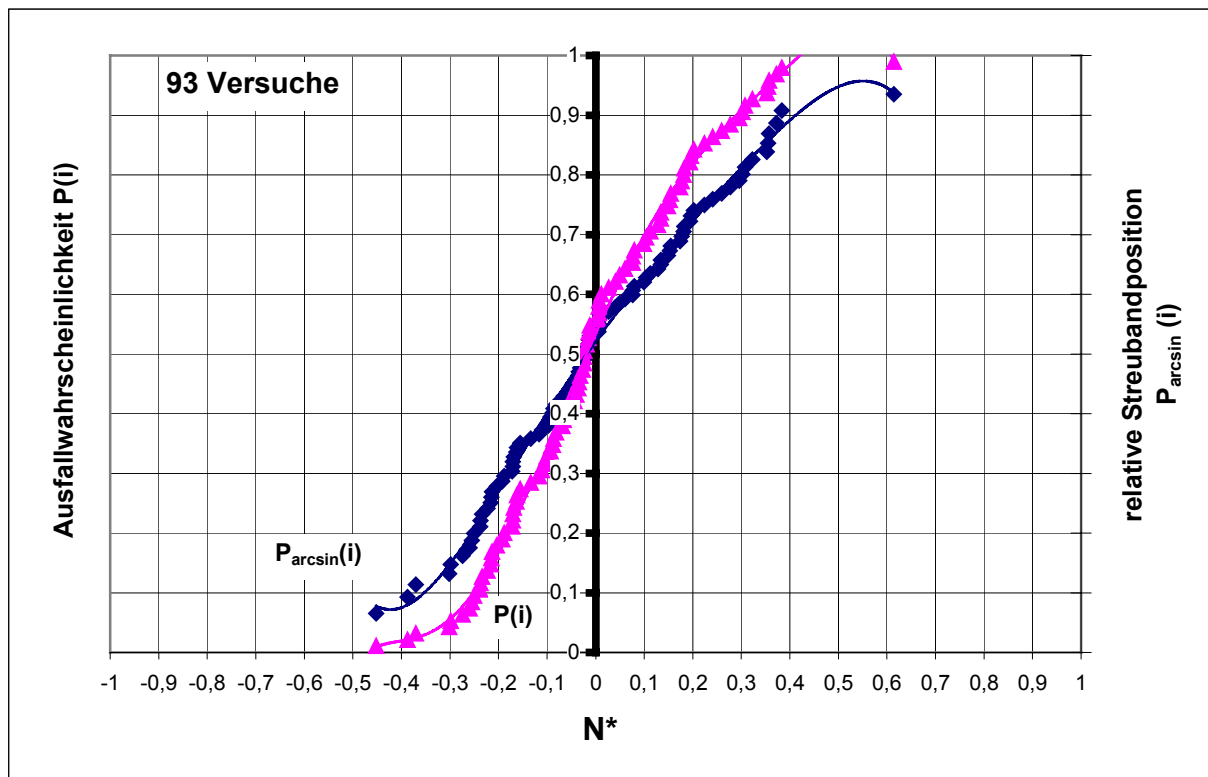


Abb. A4: Bestimmung der Ausfallwahrscheinlichkeit und Streubandbreite für trockenlaufende Kunststoffzahnräder

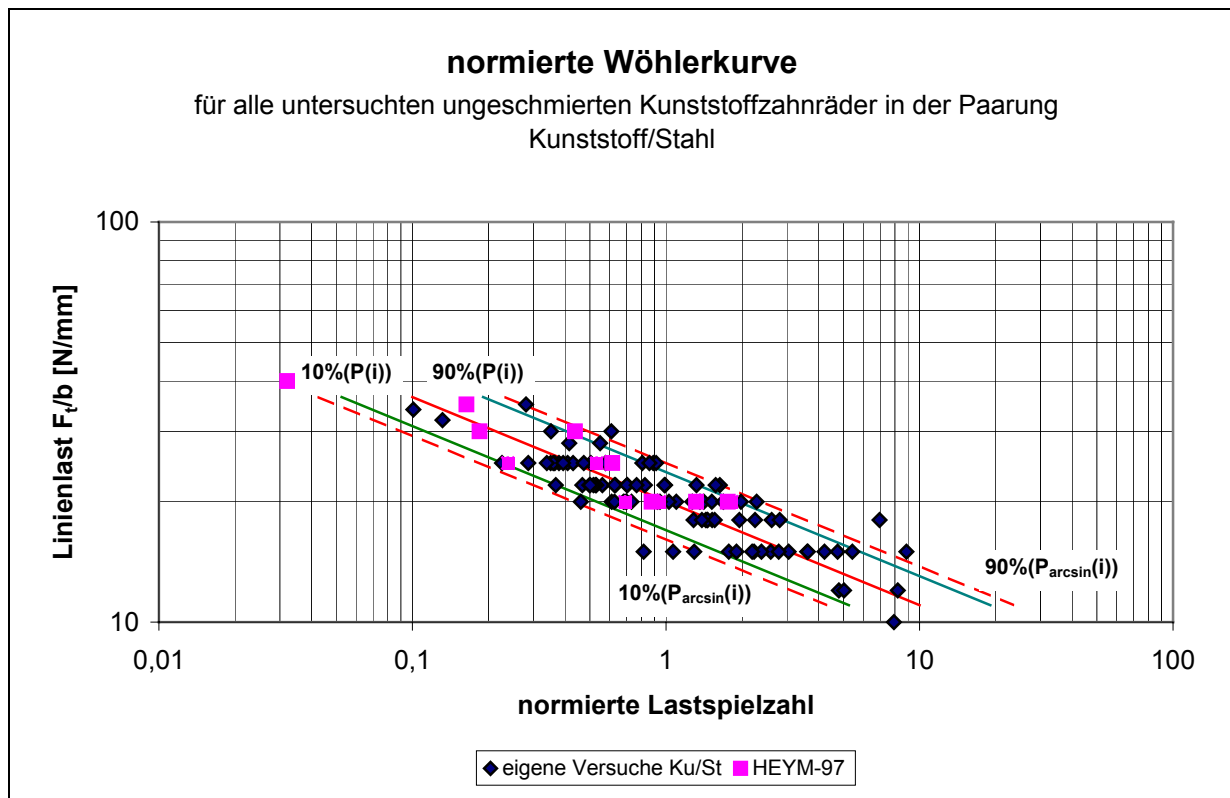


Abb. A5: Normierte Wöhlerkurve für alle untersuchten trockenlaufenden Kunststoffzahnräder in der Paarung Kunststoff/Stahl

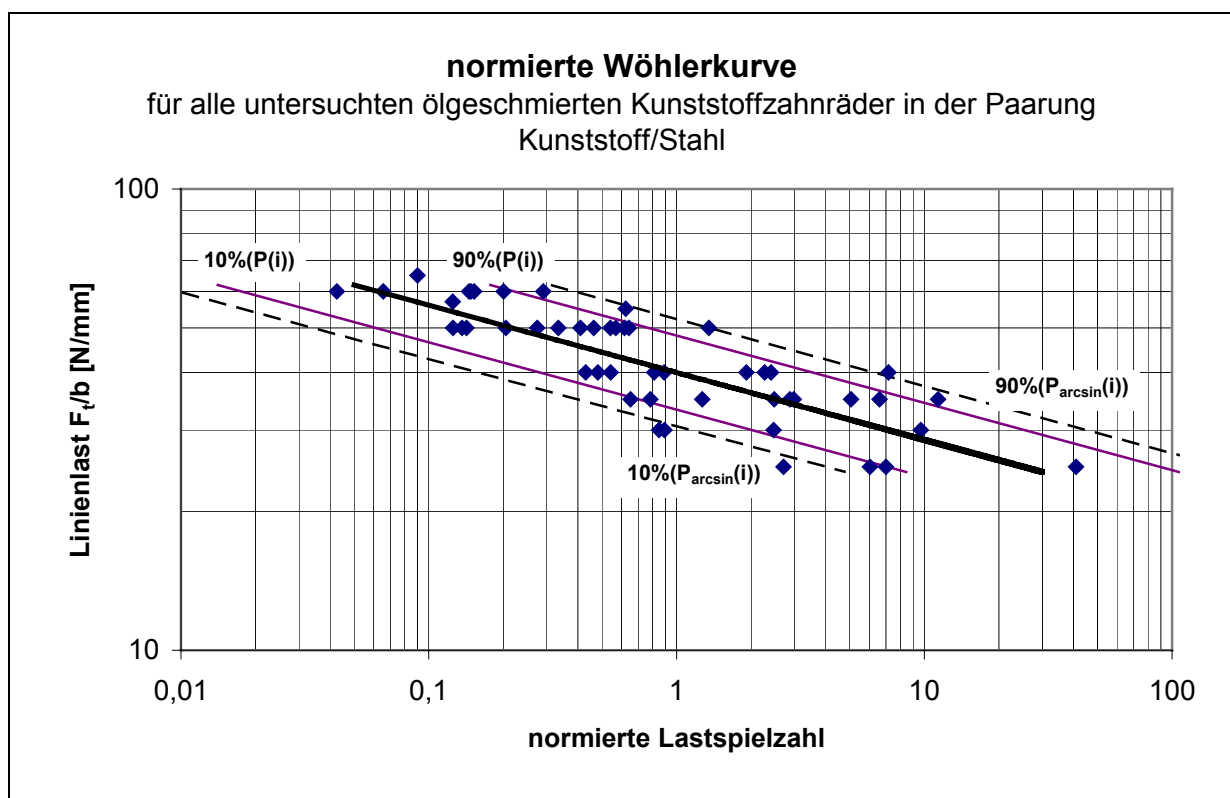


Abb. A6: Normierte Wöhlerkurve für alle untersuchten ölgeschmierten Kunststoffzahnräder in der Paarung Kunststoff/Stahl

Werkstoff	Exponent k	Bezugslastspielzahl N_{40} [Lastspiele]	Streuspanne T_N
PEEK CA30	6,83	$3,558 \cdot 10^7$	1:39,7
PEEK 450G	6,83	$0,119 \cdot 10^7$	1:39,7
PEEK FC30	6,83	$0,013 \cdot 10^7$	1:39,7

Tab. 3A: Gegenüberstellung der Zeitfestigkeitskennwerte der untersuchten ölgeschmierten Kunststoffzahnräder

Werkstoff	Exponent k	Anschmelzlast F_t/b [N/mm]	Bezugslastspielzahl N_{20} [Lastspiele]	Streu-spanne T_N	Mittlerer Wirkungsgrad η [%]
PA66+20%AF	3,85	28	$2,944 \cdot 10^7$	1:5,5	92,5
PA66+15%AF +10%PTFE	3,85	>35	$0,228 \cdot 10^7$	1:5,5	93,8
PA66+20%CF	3,85	25	$1,249 \cdot 10^7$	1:5,5	92,6
POM+20%CF	3,85	28	$0,316 \cdot 10^7$	1:5,5	93,2
POM+10%AF +10%PTFE	3,85	20	$0,316 \cdot 10^7$	1:5,5	94,7
PEEK FC30	3,85	>35	$0,281 \cdot 10^7$	1:5,5	-
PA46	3,85	<35	$0,167 \cdot 10^7$	1:5,5	-

Tab. 4A: Gegenüberstellung der Zeitfestigkeitskennwerte und Wirkungsgrade der untersuchten trockenlaufenden Kunststoffzahnräder

A.4 Fehlerbetrachtungen

Jede Messung unterliegt bestimmten Unsicherheiten, die es bei der Ergebnisdarstellung abzuschätzen gilt. In einer Messkette ergibt sich der Fehler des Gesamtergebnisses aus der Summe der Fehler der einzelnen Messglieder. Unter der Voraussetzung, dass eine solche Messkette mit dem Arbeitspunkt y aus den unabhängigen Variablen x_i mit den jeweiligen Abweichungen Δx_i besteht, lässt sich der relative Fehler F_r der Messkette im Arbeitspunkt y nach dem Gaußsschen Fehlerfortpflanzungsgesetz wie folgt berechnen [VDI/VDE 2620]:

$$F_r = \frac{\Delta y}{y} = \sum_{i=1}^n \frac{\Delta x_i}{x_i} \quad (\text{A-12})$$

Bei dieser Betrachtung gehen alle Fehler in die gleiche Richtung. Dies ist aber sehr unwahrscheinlich.

Unter der Annahme, dass die Fehler nicht alle in die gleiche Richtung gehen und die Fehlergrenzen normalverteilt sind, ist es möglich den relativen wahrscheinlichen Fehler mit Hilfe der Statistik und des Gaußsschen Fehlerfortpflanzungsgesetzes zu beschreiben. Der relative wahrscheinliche Gesamtfehler ergibt sich aus:

$$F_{rw} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\Delta x_i}{x_i} \right)^2} \quad (A-13)$$

Tragfähigkeitsbestimmung

Im folgenden werden die relativen der einzelnen Messglieder zur Bestimmung des Prüfmomentes und damit der Linienlast dargestellt.

Bei der Kalibrierung der Drehmomentenmesswelle können folgende Fehler auftreten:

- Trägerfrequenzmessverstärker (TFM) $\Delta x_{TFM} / x_{TFM} = 0,4\%$
laut Herstellerangabe
- Messwertanzeige $\Delta x_{MWA} / x_{MWA} = 0,4\%$
Bezogen auf den kleinsten gemessenen Bereich ($F_t/b = 10\text{N/mm}$ bei einem max. Messbereich von $F_t/b = 40\text{N/mm}$, die 10.00V entsprechen)
- Dehnungsmessstreifen (DMS) $\Delta x_{DMS} / x_{DMS} = 0,3\%$
Temperatureinflüsse werden durch eine Vollbrückenschaltung kompensiert.
Durch die Kalibrierung der Messnabe werden Fehler auf ein Minimum reduziert.
- Genauigkeit der Momentenkalibrierung $\Delta M_K / M_K = 0,3\%$
Aus den Toleranzen der Hebelarme und Kalibriergewichte errechnet.

Zu den Kalibrierfehlern können während der Messung folgende Fehler auftreten:

- Trägerfrequenzmessverstärker (TFM) $\Delta x_{TFM} / x_{TFM} = 0,4\%$
siehe oben
- Messwertanzeige $\Delta x_{MWA} / x_{MWA} = 0,4\%$
siehe oben

Somit ergibt sich ein relativer und relativ wahrscheinlicher Fehler für die Messung des Prüfmomentes von:

$$F_{rMt} = 2,2\%$$

$$F_{rwMt} = 0,9\%$$

Zahnmassentemperatur:

Die Kalibrierung der Messstrecke erfolgte mittels Festwiderstände. Daraus ergeben sich folgende Fehler:

- Linearitätsfehler der PT100 Karte $\Delta x_{RMP} / x_{RMP} \leq 0,2\%$
(Herstellerangaben [RMP])

- Ablesegenauigkeit der Anzeige $\Delta x_{MWA} / x_{MWA} = 0,4\%$

Der Anzeigebereich beträgt 0.00 - 10.00 V. Bei der vorgenommenen Kalibrierung entsprachen 10.00V einer Temperatur von 200°C. Bei den kleinsten gemessenen Wert ergibt sich diese Ablesegenauigkeit.

- Genauigkeit der Kalibrierwiderstände $\Delta x_R / x_R = 0,05\%$
(mit Ohmmeter gemessen)

Bei der Messung selber ergeben sich folgende Fehler:

- Abweichung des PT100 Messwiderstandes $\Delta x_{PT100} / x_{PT100} = 0,6\%$
(laut Hersteller)
- Linearitätsfehler der PT100 Karte $\Delta x_{RMP} / x_{RMP} \leq 0,2\%$
(siehe oben)
- Ablesegenauigkeit der Anzeige $\Delta x_{MWA} / x_{MWA} = 0,4\%$
(siehe oben)

Somit ergibt sich ein relativer und relativ wahrscheinlicher Fehler für die Messung der Zahnmassentemperatur von:

$$F_{rTz} = 1,85\%$$

$$F_{rwTz} = 0,87\%$$

A.5 Versuchsprotokolle

Ölgeschmierte Zahnräder

Versuchsnr.	Werkstoff	Prüflast F_t/b [N/mm]	Versagenslastspielzahl
1	PEEK 450G	60	4,76E+05
2	PEEK 450G	60	2,39E+05
3	PEEK 450G	57	2,05E+05
4	PEEK 450G	50	1,05E+06
5	PEEK 450G	50	1,01E+06
6	PEEK 450G	50	6,72E+05
7	PEEK 450G	50	4,50E+05
8	PEEK 450G	50	9,34E+05
9	PEEK 450G	50	5,47E+05
10	PEEK 450G	50	7,60E+05
11	PEEK 450G	40	3,95E+06
12	PEEK 450G	40	3,14E+06
13	PEEK 450G	40	1,34E+06
14	PEEK 450G	40	1,46E+06
15	PEEK 450G	40	7,06E+05
16	PEEK 450G	40	8,89E+05
17	PEEK 450G	35	4,88E+06
18	PEEK 450G	35	8,30E+06
19	PEEK 450G	35	1,87E+07
20	PEEK 450G	35	2,08E+06
21	PEEK 450G	35	1,07E+06
22	PEEK 450G	35	1,29E+06
23	PEEK 450G	30	1,39E+06
24	PEEK 450G	30	1,47E+06
25	PEEK 450G	30	4,04E+06
26	PEEK 450G	30	1,59E+07
27	PEEK 450G	25	6,72E+07
28	PEEK CA30	65	1,80E+06
29	PEEK CA30	60	1,31E+06
30	PEEK CA30	60	8,50E+05
31	PEEK CA30	60	2,95E+06
32	PEEK CA30	55	1,24E+07
33	PEEK CA30	50	2,50E+06
34	PEEK CA30	50	4,09E+06
35	PEEK CA30	50	2,84E+06
36	PEEK CA30	50	2,72E+06
37	PEEK CA30	50	1,08E+07
38	PEEK FC30	60	2,50E+04
39	PEEK FC30	60	1,90E+04
40	PEEK FC30	50	1,68E+05
41	PEEK FC30	40	8,94E+05
42	PEEK FC30	40	6,00E+04
43	PEEK FC30	40	2,82E+05
44	PEEK FC30	35	3,09E+05
45	PEEK FC30	35	8,21E+05
46	PEEK FC30	35	3,57E+05
47	PEEK FC30	25	7,51E+05
48	PEEK FC30	25	3,36E+05
49	PEEK FC30	25	8,72E+05

Tabelle 5A: Versuchsprotokolle der Tragfähigkeitsuntersuchungen an ölgeschmierten Kunststoffzahnradern, 120°C Öltemperatur, Paarung Kunststoff/ Stahl, Versagensart Zahnflankenbruch

Trockenlaufende Kunststoffzahnräder

Versuchsnr.	Werkstoff	Prüflast F_t/b [N/mm]	Versagenslastspielzahl
50	PA66+20%AF	25	2,54E+07
51	PA66+20%AF	25	1,16E+07
52	PA66+20%AF	25	6,65E+06
53	PA66+20%AF	25	9,98E+06
54	PA66+20%AF	22	4,63E+07
55	PA66+20%AF	22	1,38E+07
56	PA66+20%AF	22	1,56E+07
57	PA66+20%AF (gefr.)	22	2,86E+05
58	PA66+20%AF (gefr.)	22	4,08E+05
59	PA66+20%AF (gefr.)	22	4,02E+05
60	PA66+20%AF (gefr.)	22	3,88E+05
61	PA66+20%AF (gefr.)	22	5,95E+05
62	PA66+20%AF (gefr.)	18	9,97E+05
63	PA66+20%AF (gefr.)	18	1,74E+06
64	PA66+20%AF (gefr.)	18	2,18E+06
65	PA66+20%AF (gefr.)	15	1,47E+06
66	PA66+20%AF (gefr.)	15	1,70E+06
67	PA66+20%AF (gefr.)	15	3,28E+06
68	PA66+20%AF (gefr.)	15	6,90E+06
69	PA66+15%AF +10%PTFE	34	2,30E+05
70	PA66+15%AF +10%PTFE	32	3,00E+05
71	PA66+15%AF +10%PTFE	30	8,04E+05
72	PA66+15%AF +10%PTFE	28	9,50E+05
73	PA66+15%AF +10%PTFE	25	1,15E+06
74	PA66+15%AF +10%PTFE	25	1,32E+06
75	PA66+15%AF +10%PTFE	22	1,60E+06
76	PA66+15%AF +10%PTFE	20	5,19E+06
77	PA66+15%AF +10%PTFE	20	1,39E+06
78	PA66+15%AF +10%PTFE	20	1,55E+06
79	PA66+15%AF +10%PTFE	18	3,33E+06
80	PA66+15%AF +10%PTFE	18	5,96E+06
81	PA66+15%AF +10%PTFE	15	4,03E+06
82	PA66+15%AF +10%PTFE	15	5,90E+06
83	PA66+15%AF +10%PTFE	12	1,10E+07
84	POM+10%AF+10%PTFE	22	1,41E+06
85	POM+10%AF+10%PTFE	20	1,30E+06
86	POM+10%AF+10%PTFE	20	1,76E+06
87	POM+10%AF+10%PTFE	20	4,26E+06
88	POM+10%AF+10%PTFE	20	1,94E+06
89	POM+10%AF+10%PTFE	20	4,72E+06
90	POM+10%AF+10%PTFE	20	2,05E+06
91	POM+10%AF+10%PTFE	18	1,96E+07
92	POM+10%AF+10%PTFE	18	4,38E+06
93	POM+10%AF+10%PTFE	18	3,89E+06
94	POM+10%AF+10%PTFE	15	1,53E+07
95	POM+10%AF+10%PTFE	15	1,02E+07
96	POM+10%AF+10%PTFE	15	7,83E+06
97	POM+10%AF+10%PTFE	12	1,41E+07
98	PA66+20%CF	25	1,11E+07
99	PA66+20%CF	25	3,58E+06
100	PA66+20%CF	25	4,39E+06
101	PA66+20%CF	25	5,12E+06

Versuchsnr.	Werkstoff	Prüflast F_t/b [N/mm]	Versagenslastspielzahl
102	PA66+20%CF	22	8,79E+06
103	PA66+20%CF	22	1,24E+07
104	PA66+20%CF	22	7,89E+06
105	PA66+20%CF	20	1,70E+07
106	PA66+20%CF	20	1,76E+07
107	PA66+20%CF	20	1,37E+07
108	PA66+20%CF	18	1,79E+07
109	POM+20%CF	28	1,74E+06
110	POM+20%CF	25	1,36E+06
111	POM+20%CF	25	1,20E+06
112	POM+20%CF	22	1,78E+06
113	POM+20%CF	22	1,98E+06
114	POM+20%CF	20	2,93E+06
115	POM+20%CF	20	3,25E+06
116	POM+20%CF	20	3,00E+06
117	POM+20%CF	20	2,21E+06
118	POM+20%CF	18	4,82E+06
119	POM+20%CF	18	4,60E+06
120	POM+20%CF	15	1,14E+07
121	POM+20%CF	15	1,50E+07
122	POM+20%CF	12	2,60E+07
123	PEEK FC30	35	7,90E+05
124	PEEK FC30	25	1,03E+06
125	PEEK FC30	20	5,55E+06
126	PEEK FC30	20	3,57E+06
127	PEEK FC30	18	5,46E+06
128	PEEK FC30	15	3,00E+06
129	PEEK FC30	15	6,25E+06
130	PEEK FC30	10	2,23E+07
131	PA46	30	8,00E+05
132	PA46	25	1,20E+06
133	PA46	25	4,73E+05
134	PA46	25	6,24E+05
135	PA46	25	1,06E+06
136	PA46	22	1,09E+06
137	PA46	22	1,73E+06
138	PA46	22	1,30E+06
139	PA46	22	2,15E+06
140	PA46	15	4,01E+06
141	PA46	15	3,13E+06
142	PA46	15	1,07E+06
143	PA46	15	1,70E+06

Tabelle 6A: Versuchprotokolle der Tragfähigkeitsuntersuchungen an trockenlaufenden Kunststoffzahnradern, Paarung Kunststoff/ Stahl, Versagensart Zahnfußbruch